



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO DEL IMPACTO DE LA OPERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN EL
USO DEL AGUA PARA RIEGO EN LA CUENCA DEL RÍO TINGUIRIRICA,
CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

GONZALO JAVIER URZÚA ÓRDENES

PROFESOR GUÍA:
MARCELO OLIVARES ALVEAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
EDUARDO PEREIRA BONVALLET
XIMENA VARGAS MESA

SANTIAGO DE CHILE
2022

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: GONZALO JAVIER URZÚA ÓRDENES
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: MARCELO OLIVARES ALVEAL**

ESTUDIO DEL IMPACTO DE LA OPERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN EL USO DEL AGUA PARA RIEGO EN LA CUENCA DEL RÍO TINGUIRIRICA, CHILE

La alteración hidrológica debido a la operación de centrales hidroeléctricas de embalse es un tema ampliamente estudiado, mientras que la interferencia operacional asociada a centrales de pasada está poco estudiada. El objetivo de esta memoria es estudiar el impacto de la operación de las centrales hidroeléctricas de pasada en la parte alta del río Tinguiririca, La Confluencia y La Higuera, sobre los usuarios de riego aguas abajo, y explorar esquemas de operación que compatibilicen ambos usos.

En primer lugar, se realizó un diagnóstico de alteración hidrológica en río Tinguiririca, en base a operaciones históricas de las centrales y los datos reportados por la estación fluviométrica Tinguiririca Bajo Los Briones. El diagnóstico contempló la determinación y análisis de indicadores de alteración hidrológica a escala intradiaria, para registros entre 2000-2019, clasificados para los períodos pre y post inicio de operación de las centrales. Además, se analizó las diferencias entre el número de pulsos anuales y duración media sobre ciertos umbrales de caudal, considerando los efectos de la variabilidad climática.

Los resultados muestran un aumento significativo de la alteración hidrológica en el río Tinguiririca desde el inicio de operación de las centrales La Confluencia y La Higuera, 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. Los datos históricos de operación de las centrales evidencian que estas han privilegiado la generación eléctrica entre los días lunes y viernes, frente a los fines de semana. El análisis arrojó un aumento en la frecuencia de pulsos de caudal para umbrales bajos y una disminución para umbrales medios y altos, y, en general, una disminución de la duración de estos desde el inicio de operación de las centrales.

La evaluación de un modelo de operación de las centrales y reservorios del sistema, que maximiza el valor económico de la generación, sujeto a restricciones asociadas a los requerimientos de usuarios de riego, mostró una fuerte sensibilidad de los caudales resultantes respecto a la restricción de rampa límite. Mediante una caracterización más detallada de las preferencias de los regantes y la determinación del caudal aportante entre la restitución de las centrales y la estación fluviométrica, sería posible convertir al modelo en una herramienta de gestión del recurso hídrico, y avanzar en la compatibilización de ambos usos del agua.

*En memoria de mi madre,
Sanda Órdenes Suazola.*

Agradecimientos

Agradezco a mi mamá por enseñarme el valor del respeto, la bondad y el esfuerzo. A mi papá por siempre creer en mí, por apoyarme, por darlo todo por mis hermanos y por mí. A Lucy por su paciencia y trabajo abnegado todos los días. A Álvaro por ser mi más grande compañero de historias desde que tengo recuerdo. A Marcelo por ser el mejor hermano menor del mundo y por mostrarme siempre otra forma de ver las cosas. Sin su apoyo habría sido imposible.

A mis abuelas, Carmen y Mercedes, matriarcas que siempre velaron por la unión de mis familias materna y paterna. De ellas guardo hermosos recuerdos de infancia. A mi tía Nora por recibirme con una conversación y comida caliente cada miércoles de la enseñanza media.

Doy gracias a Cata por acompañarme en esta última etapa de la carrera, por el amor, las risas, consejos y buenos momentos que hicieron todo más fácil. A Seba por brindarme su amistad incondicional y ser mi hermano en la capital. A Ignacio por su lealtad y cariño todos estos años. A todos mis amigos que me acompañaron en el proceso, presencialmente o a la distancia. A Carlos y Pipe porque, a pesar de vernos poco, cada junta con ustedes las guardo con cariño. A Javi por una amistad de años, con altos y bajos, pero que sabemos que es a toda prueba. A Vicente por estos ingratos casi 20 años de amistad. A Pachi y Cote por todos los buenos momentos y por su amistad que espero conservar de por vida. A Ricardo por ser el amigo que siempre me tira pa' arriba y por ser un apañe en momentos duros de la carrera. A mi cocumpleaño Octavio por su amistad y ayuda desinteresada todos estos años. A Richard por ser una de las personas más singulares que he conocido. A Eli por enseñarme a ver la vida desde una óptica menos estructurada. A Gustavo, Jofré y Rochi, por cada momento que preferimos dedicar al ocio en vez de estudiar.

Agradezco enormemente al profesor Marcelo por recibirme en su equipo y por la paciencia, aprendizajes y consejos brindados. De igual manera, a Julia por los comentarios y correcciones en los avances. A Eduardo Pereira por su colaboración durante el desarrollo de esta memoria, resolviendo dudas en el área eléctrica y brindándonos acceso a la plataforma AMEBA. A la profesora Ximena Vargas, por su gentileza al aceptar formar parte de la comisión. A Miguel Ángel Guzmán, por su diligencia y la confianza depositada en el proyecto. A todos quienes aportaron en mi formación académica y personal.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Estructura del documento	2
2. Antecedentes	4
2.1. Alteración hidrológica	4
2.2. Zona de estudio	6
2.3. Clima e hidrología	8
2.3.1. Caracterización del régimen hidrológico	9
2.3.2. Hidroelectricidad	11
2.3.3. Riego	13
2.4. Sistema de reservorios Tinguiririca y Tricahue	14
3. Metodología	16
3.1. Diagnóstico	16
3.1.1. Recopilación de datos	16
3.1.2. Determinación de series de caudales turbinados	17
3.1.3. Análisis de alteración hidrológica	17
3.2. Identificación de esquemas de operación que compatibilicen usos hidroeléctrico y de riego	19
3.2.1. Determinación de series de caudales afluentes	20
3.2.2. Determinación de series de caudales aportantes entre La Higuera y Tinguiririca bajo Los Briones	21
3.2.3. Determinación del costo marginal de generación eléctrica	22
3.2.4. Plataforma AMEBA	22
3.2.5. Cálculo de IHA y análisis de restricciones según escenarios de disponibilidad hídrica	24
4. Diagnóstico de alteración hidrológica	25
4.1. Operación de centrales La Confluencia y La Higuera	25
4.1.1. Comparación entre operación real y programada	25
4.1.2. Caracterización de los caudales turbinados diarios y horarios	26
4.2. Impacto de la operación de las centrales en el caudal disponible para riego	31
4.2.1. Impacto de la operación en los caudales máximos y mínimos diarios	31
4.2.2. Frecuencia y duración de pulsos de caudal en Tinguiririca Bajo Los Briones	34

4.2.3. Índices de fluctuación intradiaria del caudal en río Tinguiririca bajo Los Briones	36
4.2.4. Operación horaria de las centrales en días de alto RBF	42
5. Compatibilización de la generación hidroeléctrica con el uso del agua para riego	49
5.1. Caracterización de esquemas preferentes para el uso de riego	49
5.2. Datos de entrada al modelo de optimización	50
5.3. Alteración hidrológica	52
5.4. Análisis de esquemas de operación del modelo de optimización	56
6. Conclusiones	58
Bibliografía	59
Anexo A. Resultados	62
A.1. Frecuencia y duración de pulsos de caudal	62
A.2. Análisis de frecuencia para los afluentes al sistema	63
A.3. Análisis de frecuencia para aportes entre La Higuera y est. Tinguiririca bajo Los Briones	67

Índice de Tablas

2.1.	Caracterización morfológica de las subcuencas río Tinguiririca Bajo y río Tinguiririca Alto.	7
2.2.	Datos de las centrales La Confluencia y La Higuera	12
2.3.	Puntos de captación y restitución para las centrales La Higuera y La Confluencia.	13
4.1.	Coefficientes de rendimiento de las centrales.	26
4.2.	Promedio y desviación estándar del caudal máximo diario, en m^3/s , para Tinguiririca bajo Los Briones y los turbinados por La Higuera.	34
4.3.	Promedio y desviación estándar del caudal mínimo diario, en m^3/s , para Tinguiririca Bajo Los Briones y los turbinados por La Higuera.	34
4.4.	Resumen de índices de alteración hidrológica a nivel intradiario para Río Tinguiririca bajo Los Briones. Temporada de no riego.	41
4.5.	Resumen de índices de alteración hidrológica a nivel intradiario para Río Tinguiririca bajo Los Briones. Temporada de riego.	42
4.6.	Selección de días RBF con percentil 95 en Tinguiririca Bajo Los Briones.	45
4.7.	Selección de días RBF con percentil 75 en Tinguiririca Bajo Los Briones.	48
A.1.	Frecuencia de pulsos anuales para los umbrales 1M, 3M, 5M y el 90 % del caudal de diseño de la central La Higuera.	62
A.2.	Duración media anual de pulsos, en horas, para los umbrales 1M, 3M, 5M y el 90 % del caudal de diseño de la central La Higuera.	62
A.3.	Comparación de la media de pulsos anual para distintos umbrales de caudal entre los períodos 2000-10 y 2011-19.	62
A.4.	Prueba χ^2 para la distribución Pearson, con un nivel de significación de 0,05 para los caudales medios diarios de los afluentes al reservorio Tinguiririca (E1).	66
A.5.	Prueba χ^2 para la distribución Pearson, con un nivel de significación de 0,05 para los caudales medios diarios de los afluentes a la central La Confluencia que no son regulados por el reservorio Tinguiririca (E2).	66
A.6.	Prueba χ^2 para la distribución Pearson, con un nivel de significación de 0,05 para los caudales medios diarios de los afluentes al reservorio Tricahue (E3), según mes de la temporada de riego.	66
A.7.	Prueba χ^2 para la distribución Pearson, con un nivel de significación de 0,05 para los aportes entre la central La Higuera y Tinguiririca bajo Los Briones.	68

Índice de Ilustraciones

2.1.	Ubicación de la cuenca de río Tinguiririca (subcuenas de río Tinguiririca Alto (hasta bajo junta con río Claro) y río Tinguiririca Bajo).	7
2.2.	Número de días por año que Río Tinguiririca bajo Los Briones presenta registros horarios completos.	8
2.3.	Temperatura y precipitación media mensual. Tinguiririca bajo Los Briones. Período 1987-2016.	8
2.4.	Serie de caudales medios mensuales para la estación Tinguiririca bajo Los Briones. Período 1985-2019	9
2.5.	Curva de variación estacional para la estación Tinguiririca bajo Los Briones.	10
2.6.	Curva de duración de caudales medios diarios para la estación Tinguiririca bajo Los Briones.	10
2.7.	Serie de SWE para Tinguiririca bajo Los Briones. Escala diaria. Período 2000-2015.	11
2.8.	Ubicación de los principales puntos de las centrales hidroeléctricas en la subcuenca de río Tinguiririca Alto.	12
2.9.	Canales de riego en río Tinguiririca.	14
2.10.	Esquema del sistema de recursos hídricos en la parte baja de la subcuenca río Tinguiririca Alto.	15
3.1.	Ejemplo del conteo de pulsos y su duración sobre tres umbrales (una, dos y tres veces la mediana del caudal).	18
3.2.	Diagrama de procesos para el modelo de operación de las centrales sujeto a restricciones para el riego.	19
3.3.	Esquema del sistema en la interfaz de AMEBA.	20
4.1.	Series de generación diaria programada y real para las centrales La Confluencia y La Higuera. Período diciembre 2017 a diciembre 2019.	25
4.2.	Comparación entre la operación real y programada para las centrales La Confluencia y La Higuera. Período diciembre 2017 a diciembre 2019.	26
4.3.	Serie de caudales medios diarios turbinados por la central La Confluencia.	27
4.4.	Serie de caudales medios diarios turbinados por la central La Higuera.	27
4.5.	Porcentaje del tiempo que la central La Confluencia sobrepasa cierto umbral de generación, según días de la semana.	28
4.6.	Porcentaje del tiempo que la central La Higuera sobrepasa cierto umbral de generación, según días de la semana.	28
4.7.	Porcentaje del tiempo que el caudal turbinado en La Confluencia para los períodos 2011-14 y 2018-19 supera cierto umbral, según bloque de demanda.	29
4.8.	Porcentaje del tiempo que el caudal turbinado en La Higuera para los períodos 2011-14 y 2018-19 supera cierto umbral, según bloque de demanda.	29
4.9.	Caudal medio [m^3/s] turbinado en la central La Confluencia en cada bloque horario, para las temporadas de riego y no riego.	30

4.10.	Caudal medio [m^3/s] turbinado en la central La Higuera en cada bloque horario, para las temporadas de riego y no riego.	31
4.11.	Frecuencia acumulada de caudales máximos diarios para la estación Tinguiririca bajo Los Briones, según temporada.	32
4.12.	Frecuencia acumulada de caudales mínimos diarios para la estación Tinguiririca bajo Los Briones, según temporada.	32
4.13.	Frecuencia acumulada de caudales máximos diarios turbinados por la central La Higuera, según temporada. Período 2011-2019	33
4.14.	Frecuencia acumulada de caudales mínimos diarios turbinados por la central La Higuera, según temporada. Período 2011-2019	33
4.15.	Variación en el tiempo del número de pulsos anuales registrados para 1M, 3M, 5M y el 90 % del caudal de diseño de La Higuera, en Tinguiririca bajo Los Briones.	35
4.16.	Duración media de pulsos (en horas) para los umbrales 1M, 3M, 5M y 90 % del caudal de diseño de La Higuera.	35
4.17.	Media de pulsos al año sobre cada umbral para los períodos 2000-10 y 2011-19, en Tinguiririca bajo Los Briones.	36
4.18.	Valores del índice de Richards-Baker a nivel intradiario para Tinguiririca bajo Los Briones.	37
4.19.	Rango diario de caudales en Tinguiririca bajo Los Briones, para el período 2000-2019.	37
4.20.	Rango diario de caudales normalizado por el caudal medio diario, en Tinguiririca bajo Los Briones.	38
4.21.	Coefficiente de variación del flujo para períodos de 24 horas, para el período 2000-2019. Río Tinguiririca bajo Los Briones.	38
4.22.	Curvas de duración en Tinguiririca Bajo Los Briones de RBF, PTF y CDV que comparan los periodos pre y post inicio de operación de las centrales en temporada de riego y no riego.	40
4.23.	Comparación de caudal turbinado por La Higuera y La Confluencia con el registrado en T. bajo Los Briones, en días con RBF pertenecientes al percentil 95. Temporada de riego.	43
4.24.	Comparación de caudal turbinado por La Higuera y La Confluencia con el registrado en T. bajo Los Briones, en días con RBF pertenecientes al percentil 95. Temporada de no riego.	44
4.25.	Comparación de caudal turbinado por La Higuera y La Confluencia con el registrado en T. bajo Los Briones, en días con RBF pertenecientes al percentil 75. Temporada de riego.	46
4.26.	Comparación de caudal turbinado por La Higuera y La Confluencia con el registrado en T. bajo Los Briones, en días con RBF pertenecientes al percentil 75. Temporada de no riego.	47
5.1.	Serie de caudales para la entrada 1 (E1) para el mes de enero, simuladas mediante el método de Montecarlo.	50
5.2.	Serie de caudales para la entrada 2 (E2) para el mes de enero, simuladas mediante el método de Montecarlo.	50
5.3.	Serie de caudales para la entrada 3 (E3) para el mes de enero, simuladas mediante el método de Montecarlo.	51
5.4.	Proyecciones del costo marginal, en USD por MWh, empleados como referencia para los meses de riego. Período 2021-2022.	51

5.5.	Series de caudal en Tinguiririca bajo Los Briones, resultantes del modelo de operación para el mes de octubre, junto a los costos marginales de generación eléctrica de referencia, bajo distintas restricciones de rampa de caudal.	53
5.6.	Efecto de combinaciones de restricciones de caudal mínimo y rampa máxima sobre el RBF, en Tinguiririca Bajo Los Briones.	54
5.7.	Ejemplos de generación obtenido a partir del modelo, para el mes de enero, según restricción de rampa de caudal.	55
5.8.	Fracción promedio del caudal en Tinguiririca Bajo Los Briones, que representa los caudales en La Higuera, para los resultados del modelo de operación. . . .	56
5.9.	Comparación de ingresos por generación eléctrica simulados según nivel de restricción en la operación de centrales.	57
A.1.	Resultados del análisis de frecuencia a los caudales medios diarios de los afluentes al reservorio Tinguiririca (E1), según mes de la temporada de riego.	63
A.2.	Resultados del análisis de frecuencia a los caudales medios diarios de los afluentes a la central La Confluencia que no son regulados por el reservorio Tinguiririca (E2), según mes de la temporada de riego.	64
A.3.	Resultados del análisis de frecuencia para los caudales medios diarios de los afluentes al reservorio Tricahue (E3), según mes de la temporada de riego. . .	65
A.4.	Resultados del análisis de frecuencia para los aportes entre los caudales registrados en Tinguiririca bajo Los Briones y la central La Higuera	67

Capítulo 1

Introducción

El presente trabajo de título se enmarca en el contexto de la investigación “*Comparative study on water-food-energy nexus at the river basin level in Chile and China: Reconciling hydropower and competing water uses*”, que consiste en un proyecto conjunto de investigadores de Chile (Universidad de Chile) y China (Universidad de Tsinghua y Universidad de Zhejiang). El proyecto tiene por objetivo avanzar en el entendimiento de la naturaleza de los intercambios, o *tradeoffs*, entre hidroelectricidad y usos rivales, con foco en el riego, pesca y usos *in situ*. Dicha caracterización permitirá la identificación de alternativas de gestión del agua, como esquemas de operación de embalses o reservorios, para un grupo de cuencas con diversas condiciones en China y Chile. Como resultado, se espera una mejora en la coordinación entre hidroelectricidad y usos rivales, como consecuencia de la implementación de alternativas de gestión.

El agua es un bien escaso debido a que se encuentra en cantidades limitadas y no siempre es posible satisfacer la totalidad de las demandas. Los conflictos por uso del agua se producen cuando unos usuarios interfieren en las necesidades específicas de otro, en cuanto a cantidad, calidad o temporalidad del recurso (Meinzen-Dick y Jackson, 1996).

La hidroelectricidad, pese a ser un uso no consuntivo, puede interferir con otros usos al requerir agua para almacenamiento, y así alterar el caudal del río (Pitana, 1993). Un caso común es el conflicto con usuarios de riego aguas abajo del punto de restitución de las centrales.

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 y van Beek, 2017). Esta gestión, según diversos autores, debe tener a la cuenca como unidad territorial para el manejo sustentable de los recursos hídricos (Golubev, 1988; Dourojeanni A., 2002).

En la cuenca de Río Tinguiririca (subcuencas de río Tinguiririca Alto y río Tinguiririca Bajo), 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. Del mismo modo, en la parte alta de esta cuenca se ubican

una serie de centrales hidroeléctricas de pasada, en particular, La Confluencia y La Higuera, las cuales cuentan con cierta capacidad de regulación de caudal mediante reservorios y están emplazadas en las cercanías de las obras de riego.

Contar con un nivel de almacenamiento permite a estas centrales favorecer la generación en los horarios de mayor demanda eléctrica, mediante una operación por bloques, trayendo como consecuencia mayores caudales en el río a dichas horas. Esta rápida variación en el caudal, conocida como *hydropeaking*, genera impactos ambientales -afectando al ecosistema acuático- y a los usuarios aguas abajo, que en el caso de río Tinguiririca corresponden a usuarios de riego.

El presente trabajo estudia el conflicto entre hidroelectricidad y riego en la cuenca de río Tinguiririca, caracterizando cada uno de estos usos y sus demandas hídricas, el impacto de una operación por bloques en el riego y posibles mejoras en la gestión del agua en la cuenca, con el fin de aumentar el beneficio neto del sistema.

1.1. Objetivo general

Analizar el impacto de la operación de las centrales La Confluencia y La Higuera en los caudales disponibles para riego en la cuenca de río Tinguiririca, e identificar esquemas de operación que permitan compatibilizar ambos usos.

1.2. Objetivos específicos

- Analizar a nivel horario y diario la operación de las centrales La Confluencia y La Higuera.
- Determinar el grado y las características de la alteración hidrológica en el río Tinguiririca debido a la operación de las centrales.
- Identificar esquemas de operación de centrales que compatibilice los usos hidroeléctrico y de riego, en la cuenca de río Tinguiririca, mediante la elaboración de un modelo de operación de las centrales.

1.3. Estructura del documento

Este documento se estructura en seis capítulos. El capítulo 2, en su primera parte, repasa, mediante la revisión de fuentes bibliográficas, la base teórica de las metodologías para estudiar alteración hidrológica en cauces como consecuencia de operación de centrales hidroeléctricas. La segunda parte del capítulo 2 contextualiza el marco en el que se engloba el trabajo, datos de la zona de estudio y la caracterización del conflicto entre los distintos usos del agua que tienen lugar allí. El capítulo 3 expone la metodología de trabajo, detallando los cálculos y técnicas empleados. En el capítulo 4 se presenta el diagnóstico de la alteración hidrológica en el río Tinguiririca debido a la operación de las centrales La Confluencia y La Higuera. El capítulo 5

corresponde a la descripción del modelo y los principales resultados del modelo de operación de las centrales. Por último, en el capítulo 6 se sintetizan las principales conclusiones del trabajo.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Alteración hidrológica

En la literatura, el marco metodológico relativo al análisis de alteración hidrológica se enfoca en el impacto a ecosistemas. Sin embargo, en el presente trabajo se adoptan dichas metodologías para el análisis de alteración en caudales disponibles para riego en la cuenca de río Tinguiririca.

El cauce de un río genera las condiciones físicas del hábitat y composición de la fauna acuática. Poff *et al.* (1997) indican que las fluctuaciones naturales en el caudal juegan un rol importante en la supervivencia y en el potencial reproductivo de especies dentro de un río, a pesar de que en casos extremos puedan existir impactos negativos en la fauna íctica, especialmente en casos de alto flujo (Nagrodski *et al.*, 2012; Unfer *et al.*, 2011).

El régimen natural de un río también puede ser alterado de manera antrópica, debido a actividades como cambios en el uso de suelo, drenaje, deforestación, desvío de aguas y operación de centrales hidroeléctricas (Meile *et al.*, 2011), generando como consecuencia, por ejemplo, *hydropeaking*.

El *hydropeaking* consiste en variaciones rápidas y frecuentes en el cauce debido a la regulación del caudal aguas arriba mediante embalses o reservorios (Bejarano *et al.*, 2017a). Este esquema de operación fluctuante, generalmente, es producto del interés de generar electricidad según las variaciones en la demanda eléctrica, aumentando la generación en los momentos de alta demanda -donde usualmente los costos marginales de energía son mayores- y reduciendo generación en las horas de menor demanda. Estas fluctuaciones crean condiciones artificiales de flujo en cuanto a magnitud, duración, secuencia y frecuencia, comparado al régimen natural (Chen *et al.*, 2015; Vanzo *et al.*, 2016). Cushman (1985) y Valentin *et al.* (1995) indican que el *hydropeaking* afecta la calidad del agua, la geomorfología fluvial, la vegetación de ribera y las comunidades de peces y macroinvertebrados aguas abajo de la central.

Este esquema generalmente se supone que ocurre exclusivamente en centrales con grandes embalses, de ahí que en la mayoría de los estudios de *hydropeaking* realizados se traten este tipo de obras, mientras que la documentación sobre las centrales de pasada es casi inexistente (Ashraf *et al.*, 2018). El *hydropeaking* puede presentarse en hidroeléctricas de pasada debido

a la regulación de turbinas, manipulación de compuertas y estaciones de bombeo (Greimel *et al.*, 2018), así como a la presencia de pequeños reservorios que permiten realizar una gestión intradiaria de los afluentes para aprovechar las horas del día de mayor demanda eléctrica (Paravan *et al.*, 2004).

La alteración hidrológica producto de la operación de una central hidroeléctrica de embalse se caracteriza por cambios significativos en el flujo a diferentes escalas de tiempo, modificando la estacionalidad o generando pulsos a nivel intradiario, debido a la capacidad de almacenar y liberar agua en meses y horas del día de mayor demanda eléctrica, respectivamente (Bejarano *et al.*, 2018).

Una central hidroeléctrica de pasada que posea uno o más reservorios en su sistema, debido a su limitada capacidad de almacenamiento, puede regular el caudal solo a escala intradiaria (Haas *et al.*, 2015), por lo que el *hydropeaking* a causa de la operación de estas centrales se caracteriza por una alteración intradiaria, y se debe al interés del operador de generar en el bloque de mayor demanda energética dentro del día (Jager y Bevelhimer, 2007). Debido a esto, se debe contar con datos que permitan caracterizar el nivel de afectación en la hidrología a dicha resolución. Existe una gran cantidad de estudios orientados a caracterizar los cambios en el régimen de ríos tomando como entrada datos de caudales diarios o a escala mayor (Torabi Haghighi y Kløve, 2013; Rheinheimer y Viers, 2015; Hall Jr *et al.*, 2015; Carolli *et al.*, 2015), mientras que los trabajos que cuantifican la alteración hidrológica a nivel intradiario son escasos (Braun-Cruz *et al.*, 2021).

Bejarano *et al.* (2017b) destacan la importancia de caracterizar el régimen de *hydropeaking* y cuantificar su desviación del estado sin alteración, lo que permite la identificación de un flujo objetivo. Esta caracterización puede realizarse mediante el uso de índices, que pueden ser a escala diaria u horaria. Bevelhimer *et al.* (2015) presentan una serie de indicadores para la caracterización de variaciones de flujo a nivel intradiario y emplea dichas métricas para evaluar tendencias en cauces afectados por centrales de pasada. Por su parte, el trabajo de Bevelhimer *et al.* (2015) señala que las métricas intradiarias revelan alteración en el cauce no reflejada por los indicadores a nivel de caudales medios diarios. Zimmerman *et al.* (2010), mediante el empleo de cuatro métricas basadas en caudales horarios, cuantifican la variación intradiaria del flujo como consecuencia de diferentes operaciones de embalses o reservorios.

Carolli *et al.* (2015) desarrollan dos índices que permiten estudiar las propiedades del *hydropeaking* en una cuenca, que toman como base los indicadores de Meile *et al.* (2011). Estas métricas permiten cuantificar la magnitud del *hydropeaking* en base al rango intradiario del caudal horario y a sus fluctuaciones o rampas.

Richter *et al.* (1996) plantean una metodología para evaluar el impacto en la hidrología de una obra de ingeniería, llamada Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA). El método IHA analiza la serie histórica de caudales medios diarios, caracterizando los períodos previo y posterior al impacto mediante un total de 32 parámetros estadísticos, clasificados en cinco categorías, a fin de determinar la variabilidad hidrológica en cada temporada.

En Baker *et al.* (2004) se presenta el índice de Richards-Baker, que cuantifica la frecuencia y rapidez de cambios en la serie de escorrentía, tomando como entrada los caudales medios

diarios. Zimmerman *et al.* (2010) emplean este índice para analizar la variabilidad del flujo a nivel intradiario, con caudales a nivel horario, e identificar la magnitud de alteración producto de obras de regulación, mediante la comparación entre periodos de pre y post operación.

Archer y Newson (2002) presentan un análisis de la alteración hidrológica basado en la frecuencia y duración de pulsos sobre ciertos umbrales, correspondientes a múltiplos de la mediana del flujo, para estudiar la perturbación en caudales producto de cambios en el uso de suelo. Esta técnica permite detectar tendencias en el régimen de caudales y su respectiva validación estadística, así como la comparación entre distintos ríos y locaciones del mismo río. El principal atributo de este método es que provee una síntesis clara, continua y cuantitativa de los cambios en el régimen hidrológico.

2.2. 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 3932 km^2 , y está conformada por las subcuencas de Río Tinguiririca Alto (BNA 0602) y Río Tinguiririca Bajo (BNA 0603) (Fig. 2.1; Tabla 2.1). En términos administrativos, está emplazada casi en su totalidad en la provincia de Colchagua, aunque comprende parte de las provincias de Cachapoal y Curicó. A nivel comunal, incluye territorios de las localidades de San Fernando, Chimbarongo, Teno, Placilla, Nancagua, Chépica, Santa Cruz, Palmilla, Peralillo y Pichidegua.

En la parte alta de la cuenca, definida por la junta con río Claro, existen dos estaciones fluviométricas, 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.

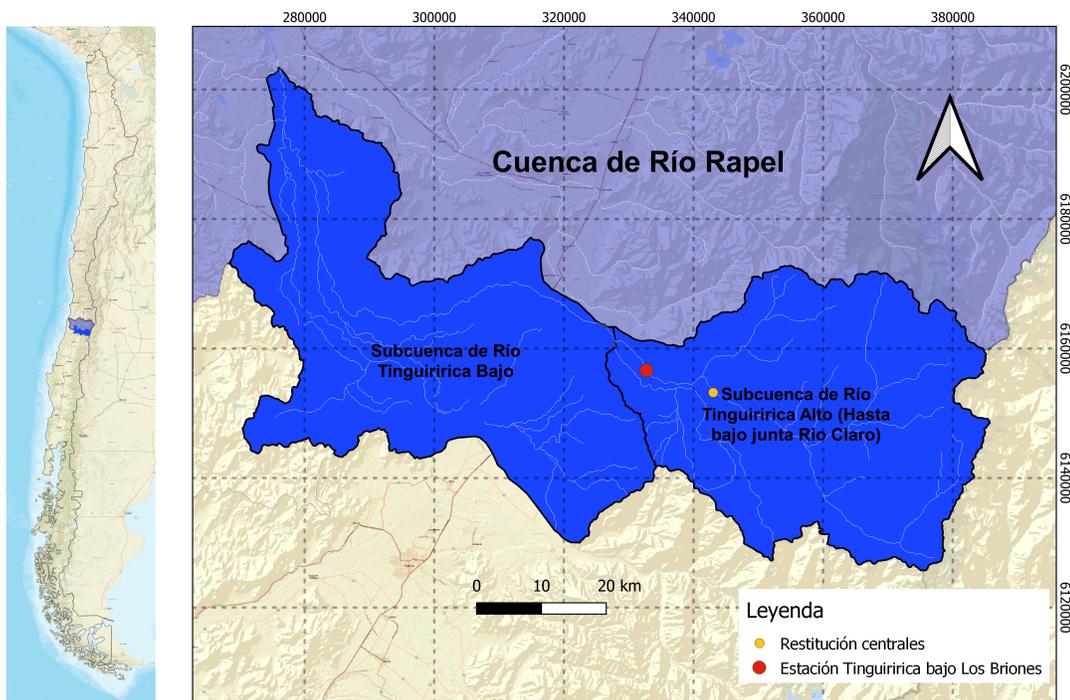


Figura 2.1: Ubicación de la cuenca de río Tinguiririca (subcuencas de río Tinguiririca Alto (hasta bajo junta con río Claro) y río Tinguiririca Bajo).

Tabla 2.1: Caracterización morfológica de las subcuencas río Tinguiririca Bajo y río Tinguiririca Alto.

Subcuenca	Código BNA	Superficie [km^2]	Elevación [m.s.n.m.]			Pendiente media [m/km]
			Media	Mín.	Máx.	
Río T. Alto	0602	1843	2336	474	4963	54,2
Río T. Bajo	0603	2089	294	105	2029	12,9

La Figura 2.2 señala un catastro de la cantidad de días por año que la estación Río Tinguiririca bajo Los Briones presenta registros horarios completos.

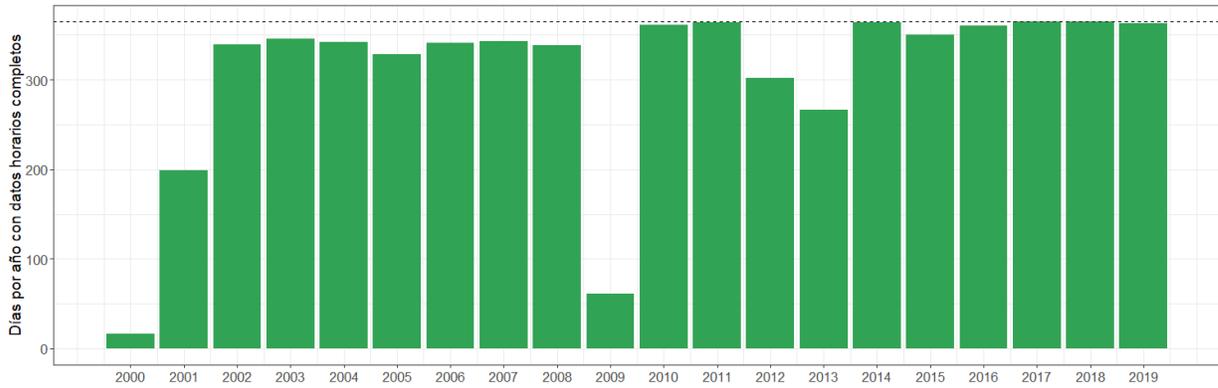


Figura 2.2: Número de días por año que Río Tinguiririca bajo Los Briones presenta registros horarios completos.

2.3. Clima e hidrología

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. El climograma de la Figura 2.3 ilustra los valores medios mensuales de la temperatura y la precipitación registrados en la estación Tinguiririca bajo Los Briones, para el período 1987 a 2016.

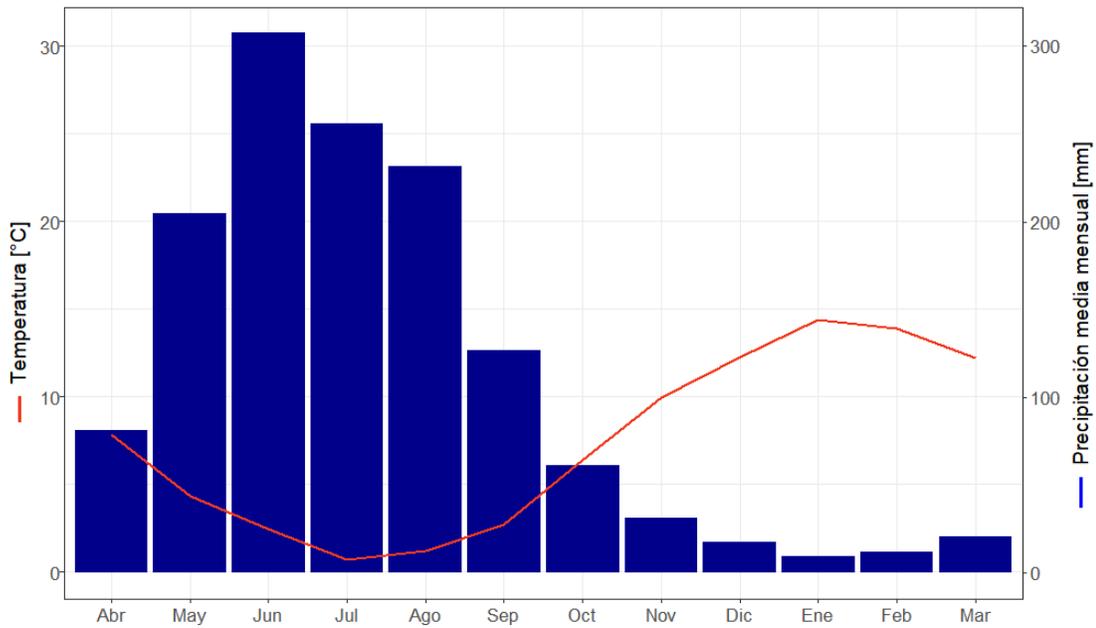


Figura 2.3: Temperatura y precipitación media mensual. Tinguiririca bajo Los Briones. Período 1987-2016.

El principal cauce de la cuenca es el río Tinguiririca, el cual cuenta con una extensión de 167 km , con un área de drenaje de 4730 km^2 y un caudal medio anual en torno a los $50\text{ m}^3/\text{s}$, que recibe aportes de los ríos del Portillo, Clarillo y Claro. Los principales cuerpos de agua corresponden a las lagunas San José, Toro, Blanca y Guzmán. En la subcuenca de río Tinguiririca Bajo se encuentra el Embalse Convento Viejo, dedicado para acumular agua para la entrega en meses de mayor demanda de riego, de septiembre a abril, que cuenta con un área de $5,6\text{ km}^2$ y una capacidad de 237 millones de m^3 .

La cuenca de río Tinguiririca presenta un régimen nival, evidenciando mayores caudales en verano producto del deshielo. En la cabecera de la cuenca, el glaciar Universidad se extiende entre los 2460 y 4500 m.s.n.m., con una longitud de 10 km y una superficie cercana a las 3000 hectáreas. Sus elevadas tasas de fusión pueden representar, en los meses de verano, alrededor del 10 % del caudal en la salida de la cuenca de río Tinguiririca (Bravo *et al.*, 2017).

2.3.1. Caracterización del régimen hidrológico

La interferencia entre hidroelectricidad y riego ocurre en la parte alta de la cuenca de río Tinguiririca. La estación Río Tinguiririca bajo Los Briones, única estación vigente y cercana a la zona, se ubica alrededor de 14 kilómetros aguas abajo del punto de restitución de la central hidroeléctrica La Higuera, y registra el caudal de río Tinguiririca posterior a la confluencia con río Clarillo. Por tanto, el análisis de los registros de dicha estación permite caracterizar el comportamiento hidrológico en el área y el grado de afección causado por la operación de las centrales.

La Figura 2.4 señala la serie de caudales medios mensuales en Tinguiririca bajo Los Briones, para el período 1985-2019. La serie indica los meses con valores máximos y mínimos reportados, así como la variabilidad intermensual, con mayores caudales en la época de deshielo. En los años recientes, se destaca que la estación no presenta registros casi en la totalidad del 2009.

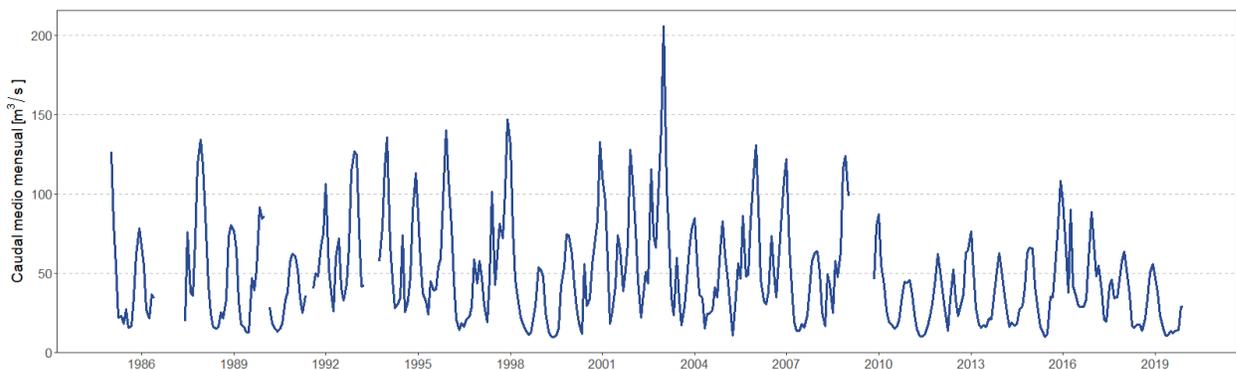


Figura 2.4: Serie de caudales medios mensuales para la estación Tinguiririca bajo Los Briones. Período 1985-2019

Tomando como base a la serie de caudales medios mensuales de la estación Tinguiririca bajo Los Briones se elabora la curva de variación estacional (Fig. 2.5) para distintas proba-

bilidades de excedencia. La gráfica indica que la zona muestra un régimen nival, donde los mayores caudales medios mensuales se registran en época estival producto del derretimiento, además de evidenciar para una probabilidad de excedencia del 5% un régimen nivopluvial.

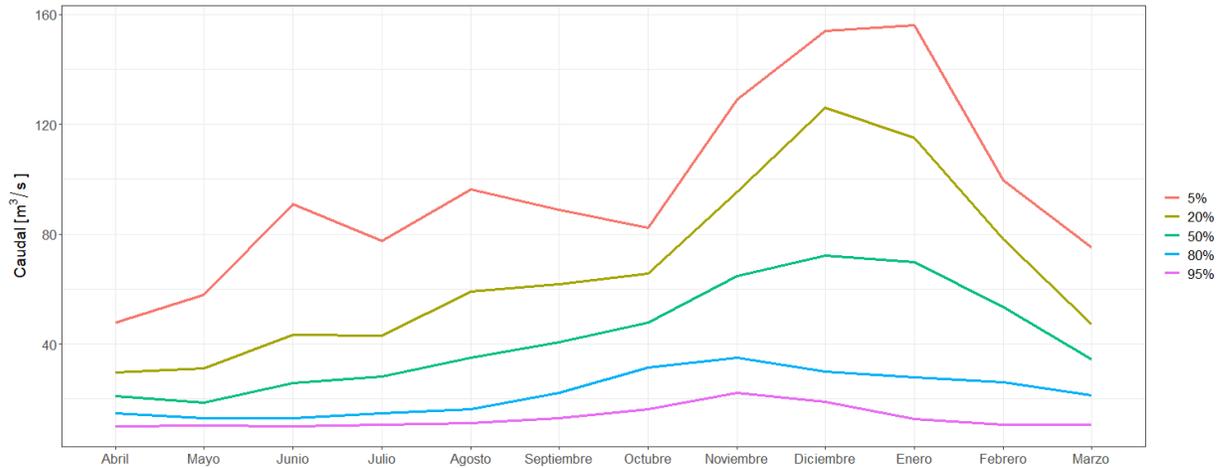


Figura 2.5: Curva de variación estacional para la estación Tinguiririca bajo Los Briones.

La Figura 2.6 muestra la curva de duración de caudales medios diarios para Tinguiririca bajo Los Briones. La figura incluye los meses de la temporada de riego (septiembre a abril) y no riego (mayo a agosto), así como la serie completa. La gráfica muestra concordancia con la Figura 2.5, donde, en general, los meses de riego reportan mayores caudales medios diarios para diferentes probabilidades de excedencia.

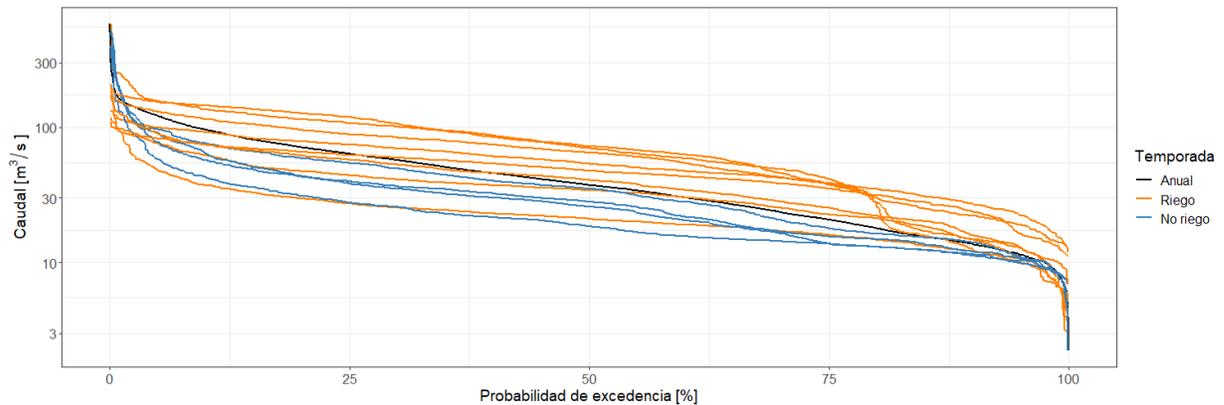


Figura 2.6: Curva de duración de caudales medios diarios para la estación Tinguiririca bajo Los Briones.

La hidrología de la cuenca de río Tinguiririca está condicionada fuertemente por aportes nivales, donde Tinguiririca Alto presenta un régimen nivopluvial y Tinguiririca Bajo uno pluvionival. Por este motivo, a continuación, se realiza una caracterización del manto nival en la cuenca a través del tiempo.

El equivalente en agua de nieve (SWE, por sus siglas en inglés) corresponde a una medida la cantidad de agua contenida en el manto nival. El SWE se puede interpretar como el espesor de agua que teóricamente resultaría si se derritiera el manto nival instantáneamente (Bernier *et al.*, 2016).

Desde la base de datos de CAMELS-CL (Alvarez-Garretton *et al.*, 2018) se obtuvieron los datos de SWE diario, que fueron generados al procesar el producto grillado de SWE de Cortés y Margulis (2017). La Figura 2.7 presenta la serie de SWE para una cuenca definida por la estación Tinguiririca bajo Los Briones, para el período 2000-2015. En la serie se observa el patrón anual de acumulación y derretimiento nival, con un aumento en la cobertura desde el mes de marzo, alcanzando niveles máximos entre agosto y septiembre, donde comienza a primar el deshielo. Se aprecia, además, que la acumulación máxima de nieve varía fuertemente año a año, donde, por ejemplo, el valor para el año 2005 quintuplica el de 2010.

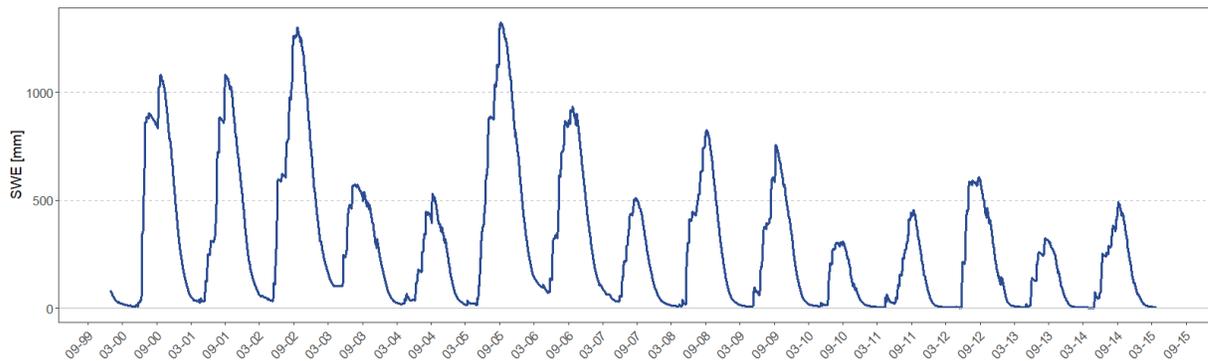


Figura 2.7: Serie de SWE para Tinguiririca bajo Los Briones. Escala diaria. Período 2000-2015.

2.3.2. Hidroelectricidad

En la región de O’Higgins existe una potencia instalada de centrales eléctricas que asciende a 1618,2 MW, de los cuales dos tercios corresponden a hidroelectricidad, generada mediante un total de 14 centrales hidroeléctricas (Coordinador Eléctrico Nacional, 2020). En la cuenca de río Tinguiririca Alto existen cuatro proyectos hidroeléctricos, todos centrales de pasada: El Paso, San Andrés, La Higuera y La Confluencia. Debido a su localización, próximas a las captaciones para riego, el presente estudio se centra en las dos últimas mencionadas.

Las centrales La Confluencia y La Higuera corresponden a dos centrales hidroeléctricas de pasada, las cuales forman parte de un sistema de centrales en serie, ambas con capacidad de almacenamiento. Estas centrales comprenden el proyecto “Hidroeléctrica La Higuera-Confluencia”, de Hidroeléctrica La Higuera S.A. e Hidroeléctrica La Confluencia S.A. Estas centrales son parte del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), sistema que coordina a las distintas generadoras de las zonas norte y centro de Chile, en pos de priorizar la operación de centrales de menor costo marginal. En el caso de las centrales de pasada, debido al escaso o nulo control del caudal turbinado, no están sujetas a la coordinación del organismo central,

debiendo solo reportar lo generado (Bauer, 2009).

La Tabla 2.2 muestra los datos de fecha de entrada en operación, capacidad y caudal de diseño de las centrales, mientras que la Figura 2.8 y Tabla 2.3 señalan la ubicación de los principales puntos de captación de las centrales y el punto de restitución de la central La Higuera, así como el caudal asociado a los derechos de agua de cada bocatoma.

Tabla 2.2: Datos de las centrales La Confluencia y La Higuera

Central	Inicio operaciones	Potencia inst. [MW]	Caudal diseño [m^3/s]
La Confluencia	Dic. 2010	163	52,3
La Higuera	Sept. 2010	155	50,0

El reservorio de la central La Confluencia cuenta con una capacidad de 1,2 millones de m^3 , volumen que permite la operación a plena capacidad durante 6,4 horas. El almacenamiento para regulación de la central La Higuera tiene una capacidad máxima de 150.000 m^3 , equivalentes al poder generar a capacidad durante alrededor de 50 minutos.

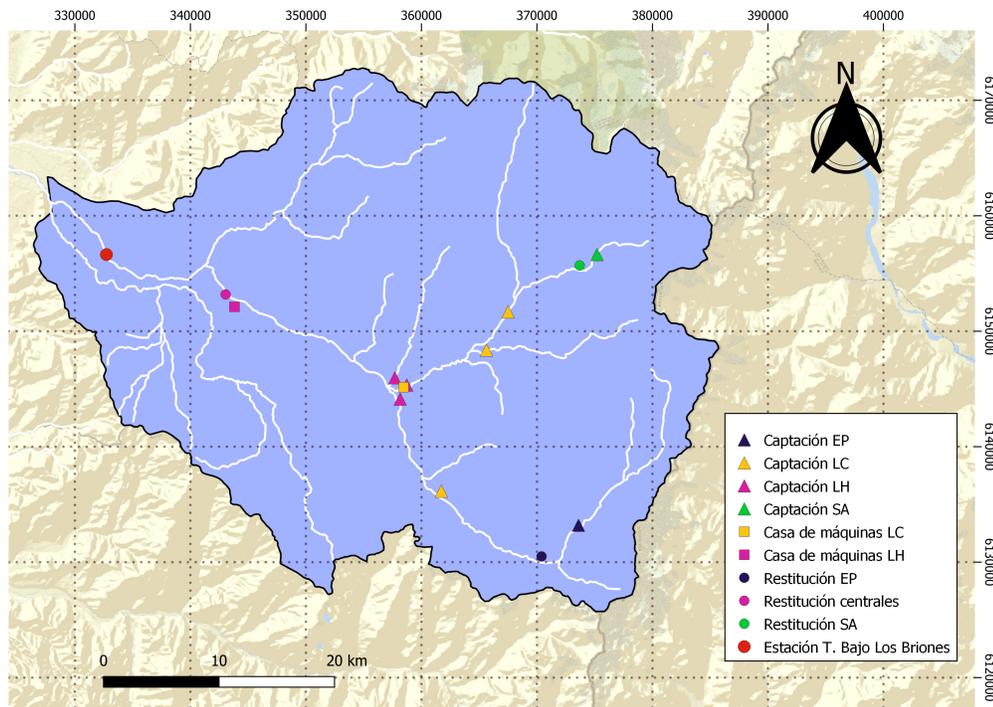


Figura 2.8: Ubicación de los principales puntos de las centrales hidroeléctricas en la subcuenca de río Tinguiririca Alto.

Tabla 2.3: Puntos de captación y restitución para las centrales La Higuera y La Confluencia.

Zona	Bocatoma	Caudal [m^3/s]	Coordenadas UTM	
			Este [m]	Norte [m]
Captación LC	Portillo	25,0	367.502	6.151.677
	Tinguiririca	25,0	361.722	6.136.156
	Del Azufre	1,5-2,3	365.627	6.148.369
Captación LH	Los Helados	2,0 ¹	357.697	6.145.969
	La Puya	30,0	358.732	6.145.345
	Tricahue	23,0	358.162	6.144.129
Restitución LH	-	-	343.053	6.153.188

Fuente: EIA Proyecto Hidroeléctrico La Higuera. Descripción del proyecto.

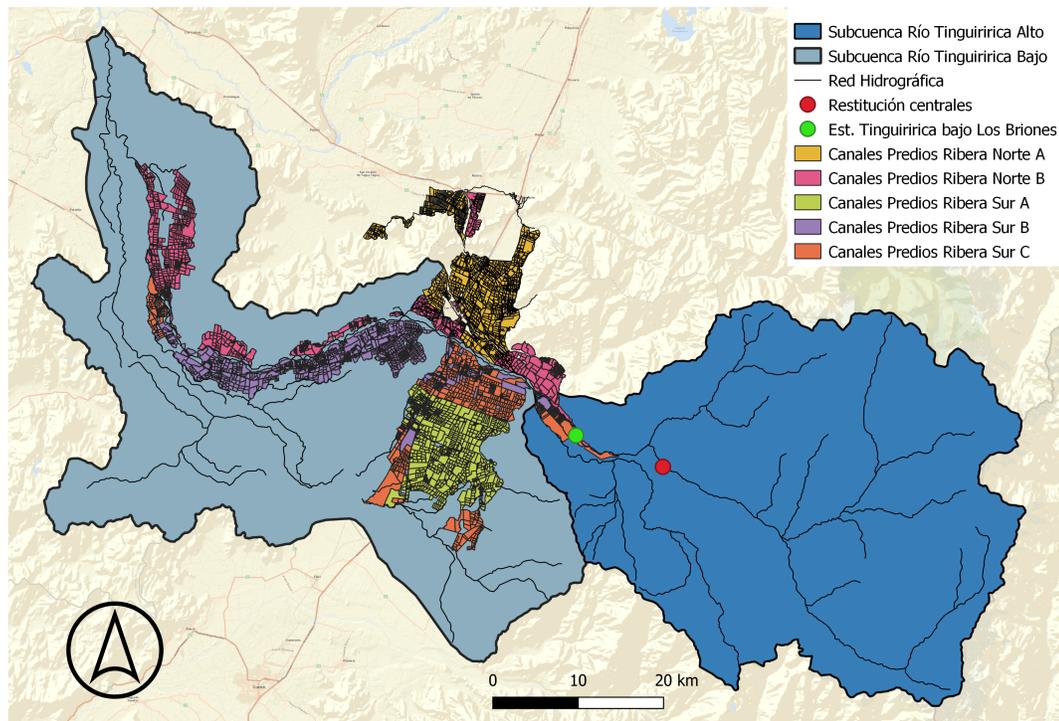
2.3.3. Riego

Mediante canales, el río Tinguiririca permite abastecer de agua para riego a alrededor de 50.000 hectáreas del valle de Colchagua. Las áreas irrigadas comprenden sectores de las comunas de San Fernando, Malloa, San Vicente, Chimbarongo, Placilla, Nancagua, Santa Cruz y Palmilla. La mayor parte de las plantaciones de esta zona corresponden a cultivos vinícolas y cereales, y, en un menor grado, frutas y hortalizas.

En base al levantamiento topográfico realizado por la Junta de Vigilancia de Río Tinguiririca, se cuenta con datos de los canales y las zonas irrigadas a partir de captaciones en el río Tinguiririca. Figura 2.9.

La estación Río Tinguiririca bajo Los Briones permite cuantificar el caudal pasante por el río, previo a la distribución a los distintos predios mediante los canales de regadío. Los registros de esta estación fluviométrica perciben el caudal turbinado por la central La Higuera con una latencia cerca a 2,5 horas.

¹ Solo dos meses al año.



Fuente: Junta de Vigilancia Río Tinguiririca.
 Figura 2.9: Canales de riego en río Tinguiririca.

2.4. Sistema de reservorios Tinguiririca y Tricahue

Las centrales La Confluencia y La Higuera se alimentan a partir de una serie de bocatomas de manera directa o indirecta, a través del previo paso por reservorios. La Figura 2.10 muestra la serie de componentes que conforman este sistema de recursos hídricos.

No se dispone de datos de series de caudales para las distintas bocatomas, ni de afluentes a los distintos reservorios. Sin embargo, existen registros horarios para la estación Río Tinguiririca bajo Los Briones, así como la posibilidad de calcular los caudales turbinados por ambas centrales, a escala horaria.

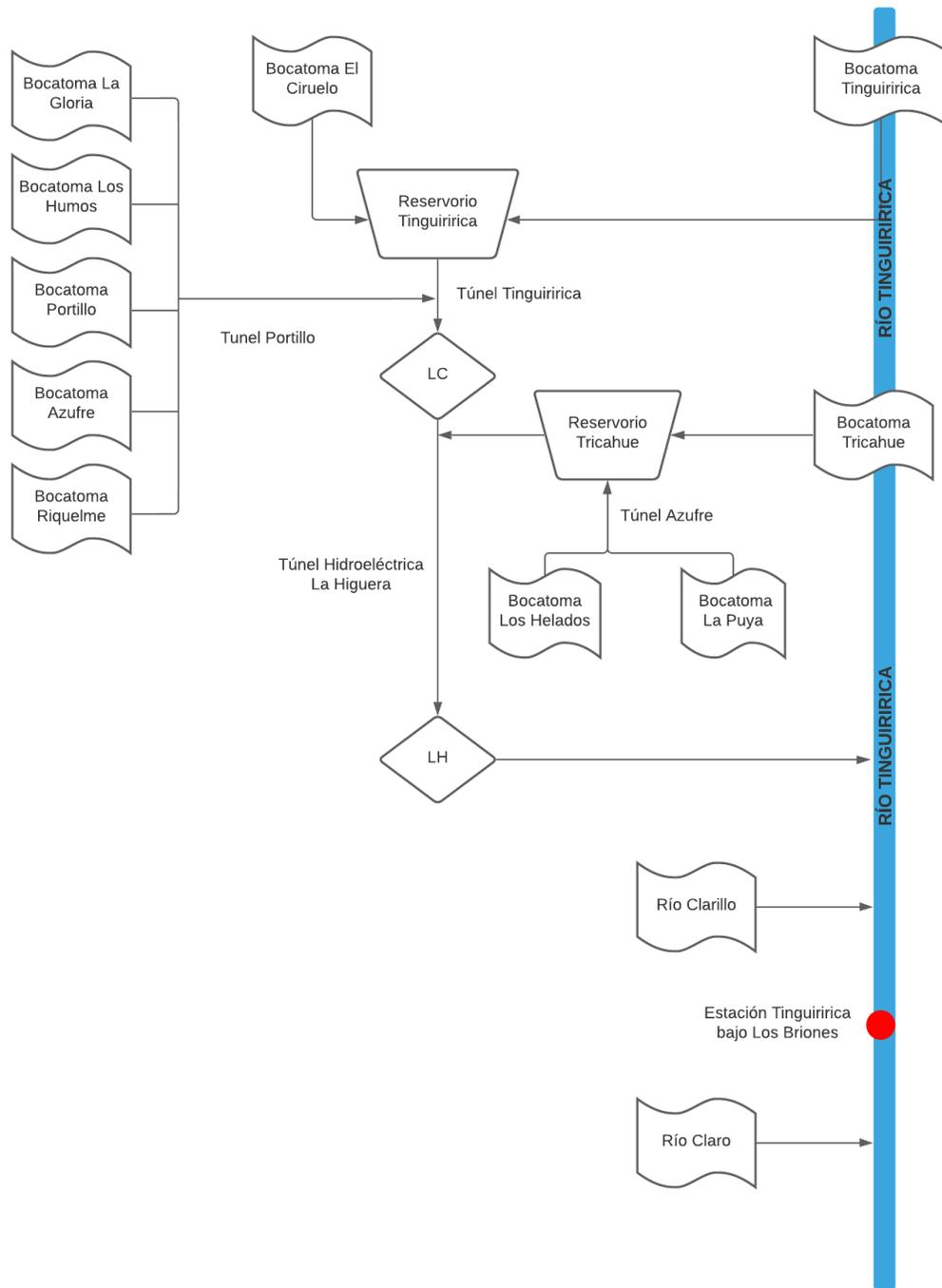


Figura 2.10: Esquema del sistema de recursos hídricos en la parte baja de la subcuenca río Tinguiririca Alto.

Capítulo 3

Metodología

El presente trabajo contempla dos partes: la primera consiste en un diagnóstico de la alteración hidrológica en el río Tinguiririca producto de la operación histórica de las centrales La Confluencia y La Higuera, y la segunda en la implementación y ejecución de un modelo de optimización para la operación de las centrales La Confluencia y La Higuera, bajo restricciones asociadas a la compatibilización con el uso de riego. El diagnóstico contempla el análisis de las series de caudales turbinados por las centrales y el caudal registrado en la estación Tinguiririca bajo Los Briones, mediante indicadores de alteración hidrológica, análisis estadístico de caudales máximos y mínimos, evaluación de cambios en pulsos de caudales entre el período previo y posterior al inicio de operación de las centrales. Por su parte, el modelo de optimización es montado en la plataforma AMEBA, software orientado a sistemas eléctricos, adaptado para fines de gestión hídrica.

3.1. Diagnóstico

3.1.1. Recopilación de datos

Desde el sitio web de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas¹, en su apartado “Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea”, se recopilaron datos de caudales horarios y caudales medios diarios para la estación Río Tinguiririca bajo Los Briones, para el período 1980-2020.

Los datos diarios de Equivalente en Agua de Nieve (SWE, por sus siglas en inglés) fueron descargados desde la base de datos del sitio web de CAMELS-CL², perteneciente al Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)².

Los reportes horarios de operación programada y real de las centrales La Higuera y La Confluencia se obtuvieron del sitio web del Coordinador Eléctrico Nacional³, en los documentos de Programa Diario de Generación y Generación Real del Sistema, respectivamente.

¹ <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>

² <http://camels.cr2.cl/>

³ <https://www.coordinador.cl>

3.1.2. Determinación de series de caudales turbinados

Debido a que la generación de cada central hidroeléctrica depende del caudal que turбина, es posible obtener la serie horaria de caudales turbinados a partir de la serie de potencia generada de cada central, relacionando ambas variables con el coeficiente de rendimiento propio de la central, como indica la ecuación 3.1.

$$P_t = kQ_t^{turb} \quad (3.1)$$

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].

3.1.3. Análisis de alteración hidrológica

En primer lugar, se indaga respecto a la bibliografía asociada al *hydropeaking* producto de la operación de centrales hidroeléctricas, sus diferentes efectos y características según tipo de central. En este contexto, se exploran diferentes mecanismos o índices que permiten cuantificar, describir y analizar la alteración en el caudal, a diferentes escalas de tiempo, debido a la acción de un embalse o reservorio.

Se emplea el índice de Richards-Baker, en adelante RBF, que permite cuantificar las oscilaciones en el caudal con respecto al flujo total en cierto período, como se plantea en Baker *et al.* (2004). Tomando como entradas los caudales medios diarios y horarios es posible calcular los índices de Richards-Baker diario (RBF diario) y horario (RBF horario), respectivamente, empleando la ecuación (3.2).

$$RBF = \frac{\sum_{i=1}^n |q_{i+1} - q_i| + |q_i - q_{i-1}|}{2 \cdot \sum_{i=1}^n q_i} \quad (3.2)$$

Donde q corresponde es el caudal (horario o medio diario) y n al total de registros dentro del período. Este índice se puede interpretar como la suma en valor absoluto de las rampas en la serie de caudales, hacia delante y atrás. Un valor mayor de RBF indica una mayor rapidez y frecuencia en los cambios de escorrentía en el corto plazo, con un valor máximo de 2 (rampas sucesivas de 0 a un valor no nulo) y mínimo 0 (caudal constante durante el día).

Otro índice empleado para analizar la variación intradiaria en el caudal corresponde al rango. El rango de ciclo diurno (RDC, por sus siglas en inglés), o rango, equivale a la diferencia entre el mayor y el menor caudal registrado durante el transcurso de un día (24 horas), como indica la Ecuación (3.3), donde q_i a la serie de caudales horarios dentro de un día cualquiera.

$$RDC = \max(q_i) - \min(q_i) \quad (3.3)$$

Para cada día se calcula el Porcentaje del flujo total (Lundquist y Cayan, 2002), PTF por

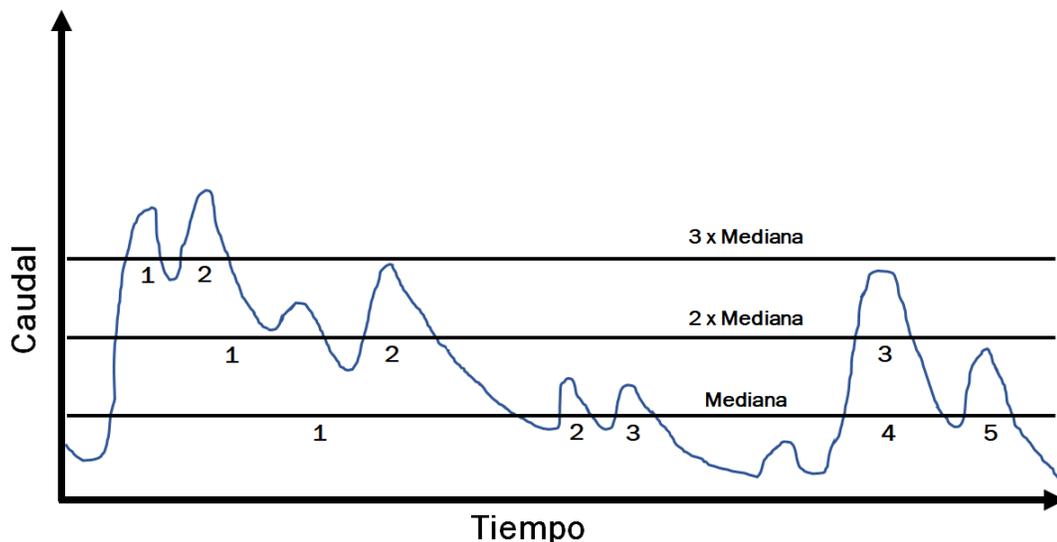
sus siglas en inglés, que corresponde al valor de RDC dividido por la suma de los registros diarios de caudal, como muestra la Ecuación (3.4). Este índice indica a qué fracción de la descarga total del día equivale el rango de caudales. Para días de altas fluctuaciones se espera un valor de PTF mayor (con un máximo de 1, donde la totalidad de los registros excepto uno sean nulos) y, de modo contrario, para un día de caudal relativamente constante un PTF bajo (con mínimo 0, donde el valor máximo y mínimo son iguales).

$$PTF = \frac{\max(q_i) - \min(q_i)}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (3.4)$$

El coeficiente de variación, o CDV, por sus siglas en inglés, propuesto por McKinney *et al.* (2001), permite analizar la dispersión de los caudales dentro de 24 horas, empleando para esto la desviación estándar ($s(q_i)$) de los registros horarios normalizada por el promedio de registros de caudal las 24 horas (\bar{q}_i) (Ecuación (3.5)).

$$CDV = \frac{s(q_i)}{\bar{q}_i} \quad (3.5)$$

Adicionalmente, se adopta la metodología del trabajo de Archer y Newson (2002), que requiere registros intradiarios de caudal, y cuyo análisis de la perturbación hidrológica se basa en la frecuencia y duración de pulsos sobre ciertos umbrales del hidrograma. Un pulso corresponde a un registro donde el caudal sobrepasó un caudal dado durante cierta duración. La duración corresponde a la diferencia de tiempo entre que sobrepasó el umbral hasta que alcanzó un valor inferior a éste. Por ejemplo, en la Figura 3.1 para el umbral de tres veces la mediana existen dos pulsos, para la de dos veces existen tres y, finalmente, para el pulso de una mediana se presentan cinco pulsos. Como referencia para establecer los umbrales se emplea la mediana del caudal del período 2000 al 2019.



Fuente: Modificado de Archer y Newson (2002).

Figura 3.1: Ejemplo del conteo de pulsos y su duración sobre tres umbrales (una, dos y tres veces la mediana del caudal).

3.2. Identificación de esquemas de operación que compatibilicen usos hidroeléctrico y de riego

En el presente trabajo se elabora un modelo de optimización para la operación de los reservorios Tinguiririca y Tricahue, mediante el uso de series sintéticas de caudales, a fin de identificar posibles esquemas de operación que compatibilicen los usos hidroeléctricos y de riego. El modelo sigue un criterio de maximización de ingresos debido a la generación eléctrica por parte de las centrales, sujeto a restricciones de capacidad de almacenamiento de los distintos reservorios y las relacionadas al riego. La metodología empleada se indica, en términos generales, en el esquema de la Figura 3.2.

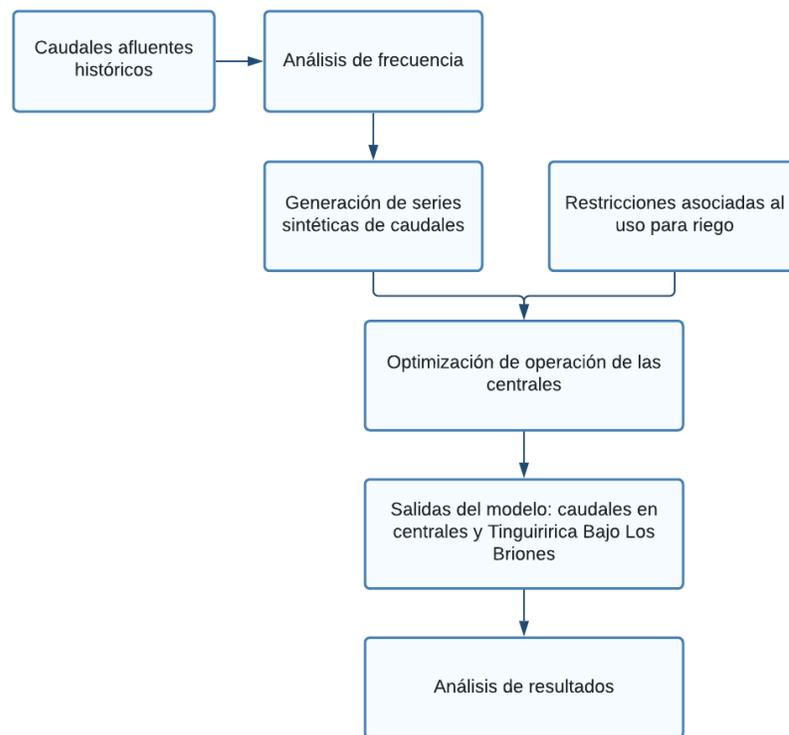


Figura 3.2: Diagrama de procesos para el modelo de operación de las centrales sujeto a restricciones para el riego.

El sistema de recursos hídricos compuesto por las centrales La Confluencia y La Higuera, los reservorios Tinguiririca y Tricahue, sus afluentes y efluentes, indicado en la Figura 2.10, se puede simplificar agrupando las series de bocatomas como entradas puntuales. La entrada 1 nace de acoplar los aportes de las bocatomas Tinguiririca y El Ciruelo al reservorio Tinguiririca. La entrada 2 corresponde al flujo conducido por el túnel Portillo (bocatomas Portillo, Azufre, Los Humos y Riquelme) además las captaciones de la bocatoma La Gloria. Por su parte, la entrada 3 aglomera los flujos captados por las bocatomas La Puya y Los Helados (ambos conducidos por el túnel Azufre) y por la bocatoma Tricahue. El esquema del modelo del sistema se indica en la Figura 3.3.

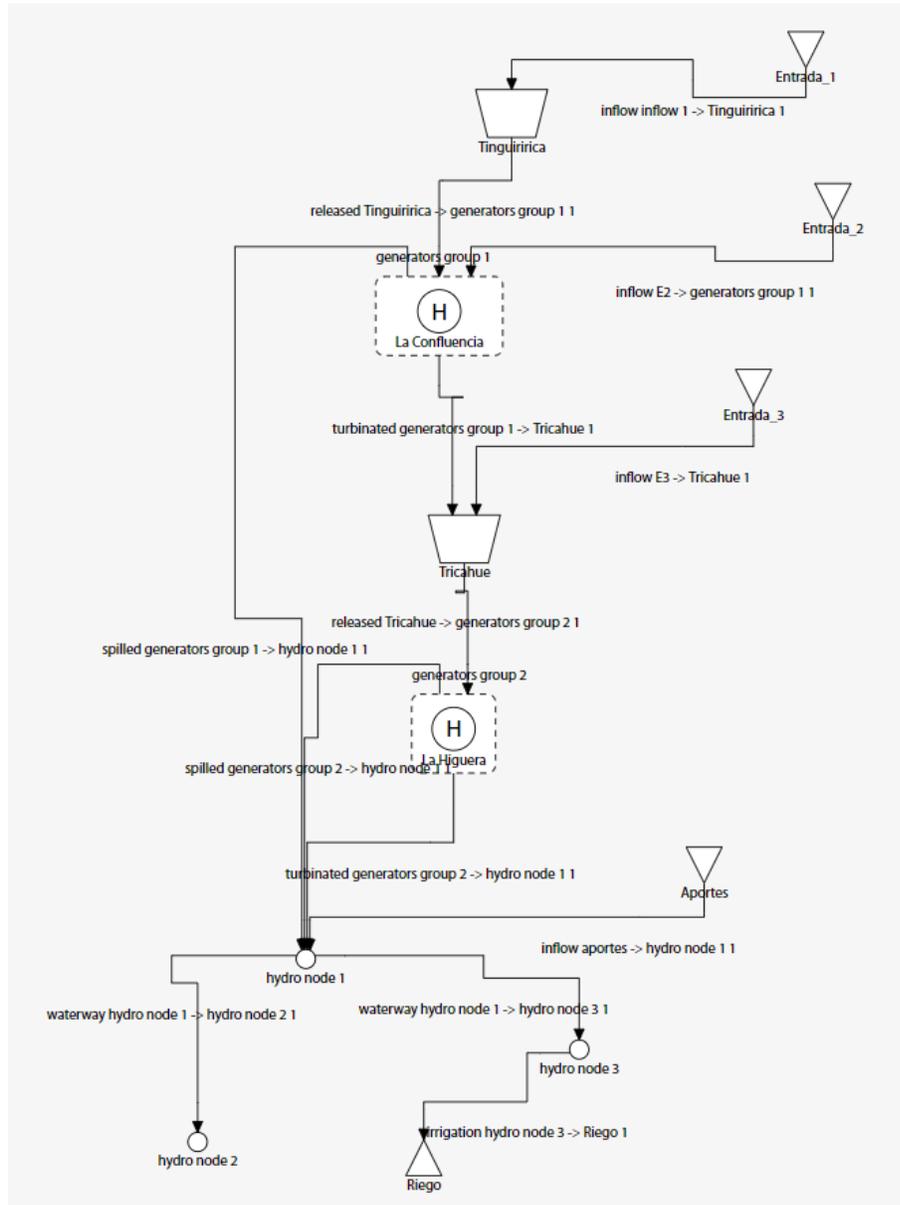


Figura 3.3: Esquema del sistema en la interfaz de AMEBA.

3.2.1. Determinación de series de caudales afluentes

A partir de las series de caudal turbinado por las centrales La Confluencia (LC) y La Higuera (LH) se determinan los volúmenes diarios turbinados. Bajo el supuesto de que la variación en el almacenamiento en los reservorios a nivel semanal es despreciable comparado a los volúmenes turbinados, es posible estimar la serie de volúmenes diarios de la entrada 3 (E_3) y la suma de las entradas 1 y 2 (E_1 y E_2).

La fracción que representan tanto E_1 como E_2 del total de afluentes a la central La Confluencia se estima bajo el supuesto de que los respectivos aportes son proporcionales a

los derechos de agua relacionados a cada captación.

Con los datos de la estación Tinguiririca bajo Los Briones, para un período previo a la operación de las centrales (2000-2009), es posible caracterizar el régimen intradiario de caudal en la cuenca para cada uno de los meses de riego (septiembre a abril), como el porcentaje estimado del total de flujo diario que escurre por hora.

Mediante un análisis de frecuencia de las series de caudales medios diarios para las entradas E_1 , E_2 y E_3 , se determina que la distribución log-normal se acopla al muestreo (Ec. 3.6) mediante pruebas de bondad de ajuste, con un nivel de significancia del 5%. Mediante simulaciones de Montecarlo se generan series sintéticas de afluentes, donde cada una de estas series sirve de entrada para el modelo de optimización.

$$\log(E_{i,m,j}) \sim \log N(\mu_{E_{i,m}}, \sigma_{E_{i,m}}^2) \quad (3.6)$$

$$E_{h,i,m,j} = k_{h,i,m} E_{i,m,j} \quad (3.7)$$

Donde $E_{h,i,m,j}$ representa la simulación j -ésima de la entrada i , para el mes m , en el bloque horario h . El coeficiente $k_{h,i,m}$ toma valores entre 0 y 1, y equivale a la fracción del volumen total que escurre en el bloque horario h , para el mes m y la entrada i .

La determinación de escenarios secos, normales y húmedos, se realiza ordenando de manera ascendente los volúmenes de afluentes, donde los valores inferiores al percentil 25 corresponden a escenarios secos, entre los percentiles 25 y 75 a escenarios normales, y los superiores al percentil 75 a escenarios húmedos.

3.2.2. Determinación de series de caudales aportantes entre La Higuera y Tinguiririca bajo Los Briones

Para cuantificar el caudal en la estación Tinguiririca bajo Los Briones en función de la operación de la central La Higuera se requiere estimar la serie de aportes entre estos dos puntos (Figura 2.10). Con este propósito se analizan las series de caudales horarios tanto de La Higuera como de Tinguiririca bajo Los Briones, para días donde las centrales operan. Se definen de manera agrupada todos estos aportes como la resta entre los caudales en Bajo los Briones y La Higuera, estos últimos con un retraso de dos horas (tiempo estimado entre La Higuera y Tinguiririca bajo Los Briones). Como resultado de este procedimiento se obtienen series de caudales medios diarios aportantes para distintos meses del período de riego. Tomando esto como base, y mediante un análisis de frecuencia se realiza un ajuste de la serie a una distribución de probabilidad. De forma análoga a los caudales afluentes, es posible generar series sintéticas de caudales mediante el método de Montecarlo.

Para caracterizar la variabilidad intradiaria de los caudales aportantes en Tinguiririca bajo Los Briones, se usa de manera auxiliar los caudales en la estación fluviométrica para los días

en que las centrales no operaron. Así, para cada bloque horario se determina un coeficiente, que equivale a qué fracción del caudal medio diario escurre en dicha hora.

3.2.3. Determinación del costo marginal de generación eléctrica

Ante la imposibilidad de eliminar la incertidumbre propia de los precios futuros de la electricidad, y bajo el supuesto que la operación de ambas centrales apuntan a maximizar el valor de la energía producida, para el modelo de optimización se utilizan como referencia proyecciones de los costos marginales de generación para el período 2020-2021, para la barra N°209 Tinguiririca 154 kV, a la cual pertenecen las centrales La Confluencia y La Higuera. Estas proyecciones son desarrolladas por SPEC, desarrolladores de la plataforma en la que se monta el modelo.

3.2.4. Plataforma AMEBA

El modelo de operación del sistema es montado en la plataforma AMEBA⁴, desarrollado por la compañía consultora SPEC Energy Consulting, especializada en sistemas de energía eléctrica y análisis energético. AMEBA es una herramienta web que permite simular el mercado eléctrico mediante proyecciones de precios de la electricidad y, entre otras cosas, determinar la manera óptima de operar los sistemas eléctricos.

Uno de los desafíos del presente trabajo consiste en evaluar la capacidad de la plataforma AMEBA, diseñada para la optimización de sistemas eléctricos, como herramienta de gestión hídrica.

El problema de optimización del sistema integrado por los reservorios Tinguiririca-Trichahue se plantea a continuación, con la función objetivo de la ecuación (4.8), sujeta a las restricciones de las ecuaciones (4.9) a la (4.23).

La función objetivo corresponde al valor de la energía producida por ambas centrales, menos las penalizaciones asociadas a infringir las restricciones de caudal mínimo o rampa máxima (ecuación (4.8)). Las restricciones (4.9) y (4.10) corresponden al balance volumétrico en los reservorios Tinguiririca y Trichahue, respectivamente. Las ecuaciones (4.11) a (4.13) corresponden al balance de volumen en ambas centrales. Además, se restringen las condiciones iniciales del volumen de ambos reservorios (ecuaciones (4.14) y (4.15)), así como la conservación del volumen a escala diaria (ecuaciones (4.16) y (4.17)). Las ecuaciones (4.18) y (4.19) restringen la conversión de caudal a potencia de generación. La ecuación (4.20) permite calcular el caudal en la estación como la suma de los caudales de La Higuera con aportes intermedios. Las ecuaciones (4.21) y (4.22) imponen la restricción de rampas de caudal en horas sucesivas para los registros en Bajo Los Briones. Las ecuaciones (4.23) y (4.24) imponen restricciones para los caudales de ambas centrales, con una cota superior dada por la

⁴ AMEBA: Plataforma web para simulación de mercados eléctricos. Mas información en <https://www.spec.cl/AmebaCloud/>

limitación técnica de la central y una cota inferior solo para la central aguas abajo a fin de asegurar un caudal mínimo.

$$\max \quad z = \sum_{i=1}^n C_{mg_i} \cdot (P_{LH_i} + P_{LC_i}) - f(\delta_{1,(i)}) - g(\delta_{2,(i)}) \quad (3.8)$$

$$\text{s.a.:} \quad V_{tin(i+1)} = V_{tin(i)} + E1_i - O_{tin(i)} - S_{tin(i)} \quad \forall i \in \{0, \dots, 23\} \quad (3.9)$$

$$V_{tri(i+1)} = V_{tri(i)} + E3_i - O_{tri(i)} - S_{tri(i)} \quad \forall i \in \{0, \dots, 23\} \quad (3.10)$$

$$E2_i + O_{tin(i)} = Q_{LC(i)} \quad \forall i \in \{0, \dots, 23\} \quad (3.11)$$

$$Q_{LC(i-1)} + O_{tri(i)} = Q_{LH(i)} \quad \forall i \in \{0, \dots, 23\} \quad (3.12)$$

$$V_{tin(0)} = 0,5 \cdot V_{tin(máx)} \quad (3.13)$$

$$V_{tri(0)} = 0,5 \cdot V_{tri(máx)} \quad (3.14)$$

$$V_{tin(0)} \leq V_{tin(n)} \quad (3.15)$$

$$V_{tri(0)} \leq V_{tri(n)} \quad (3.16)$$

$$P_{LH(i)} = k_{LH} \cdot Q_{LH(i)} \quad \forall i \in \{0, \dots, 23\} \quad (3.17)$$

$$P_{LC(i)} = k_{LC} \cdot Q_{LC(i)} \quad \forall i \in \{0, \dots, 23\} \quad (3.18)$$

$$Q_{Briones(i)} = Q_{LH(i-2)} + Q_{ap(i)} \quad \forall i \in \{0, \dots, 23\} \quad (3.19)$$

$$Q_{Briones(i)} - Q_{Briones(i-1)} \leq R_{lim} + \delta_{1,(i)} \quad \forall i \in \{0, \dots, 23\} \quad (3.20)$$

$$Q_{Briones(i)} - Q_{Briones(i+1)} \leq R_{lim} + \delta_{1,(i)} \quad \forall i \in \{0, \dots, 23\} \quad (3.21)$$

$$Q_{LH(i)} \leq Q_{LH máx} \quad \forall i \in \{0, \dots, 23\} \quad (3.22)$$

$$Q_{LC(i)} \leq Q_{LC máx} \quad \forall i \in \{0, \dots, 23\} \quad (3.23)$$

$$Q_{Briones(min)} \leq Q_{Briones(i)} + \delta_{2,(i)} \quad \forall i \in \{0, \dots, 23\} \quad (3.24)$$

Donde:

- C_{mg_i} : costo marginal de generación eléctrica en la hora i .
- P_{LH_i} : potencia generada por La Higuera en la hora i .
- P_{LC_i} : potencia generada por La Confluencia en la hora i .
- $f(\delta_{1,(i)})$ y $g(\delta_{2,(i)})$: funciones de penalización por infringir restricciones de rampa en la hora i .
- $V_{tin(i)}$: volumen en reservorio Tinguiririca en la hora i .
- $V_{tri(i)}$: volumen en reservorio Tricahue en la hora i .
- $E1_i$, $E2_i$ y $E3_i$: volumen de captaciones E1, E2 y E3 en la hora i .
- $O_{tin(i)}$: volumen efluente del reservorio Tinguiririca en la hora i .
- $O_{tri(i)}$: volumen efluente del reservorio Tricahue en la hora i .
- P_{LH_i} : potencia generada en la hora i por La Higuera.
- P_{LC_i} : potencia generada en la hora i por La Confluencia.
- k_{LH} : coeficiente de rendimiento de las central La Higuera.

- k_{LC} : coeficiente de rendimiento de las central La Confluencia.
- Q_{LHi} : caudal turbinado por la central La Higuera en la hora i .
- Q_{LCi} : caudal turbinado por la central La Confluencia en la hora i .
- $Q_{Brionesi}$: caudal reportado por la estación Tinguiririca Bajo Los Briones en la hora i .
- Q_{api} : caudal de los aportes entre La Higuera y Tinguiririca Bajo Los Briones en la hora i .
- R_{lim} : rampa límite de caudal
- Q_{LHmax} : caudal de diseño de la central La Higuera.
- Q_{LCmax} : caudal de diseño de la central La Confluencia.

3.2.5. Cálculo de IHA y análisis de restricciones según escenarios de disponibilidad hídrica

Las series de caudales en la central La Higuera y en Tinguiririca Bajo Los Briones, obtenidas como resultado del modelo de operación, se emplean para calcular los índices de alteración hidrológica. Estas métricas permiten comparar la efectividad de medidas de control del cauce, como el fijar un caudal mínimo y limitar las rampas de caudal en horas sucesivas, en la continuidad del recurso, según el mes y el escenario hídrico.

Lo anterior corresponde a un proceso iterativo, donde las restricciones son reevaluadas a fin de ir en concordancia con la disponibilidad hídrica.

Capítulo 4

Diagnóstico de alteración hidrológica

4.1. Operación de centrales La Confluencia y La Higuera

4.1.1. Comparación entre operación real y programada

La base de datos del Coordinador Eléctrico Nacional contiene reportes diarios de operación programada de las centrales La Confluencia y La Higuera, desde fines de 2017. A fin de estudiar medidas de gestión en la operación de las centrales, se comparan los reportes de generación programada con los de generación real. En la Figura 4.1 se compara las series de generación diaria, programada y real, de las centrales desde que se comenzó a reportar el programa de generación. Para ambas centrales, las series programada y real manifiestan una alta concordancia, con un patrón casi idéntico, y se corrobora con lo que indica la Figura 4.2, donde los puntos (datos de generación diaria) se orientan en torno a recta 1:1.

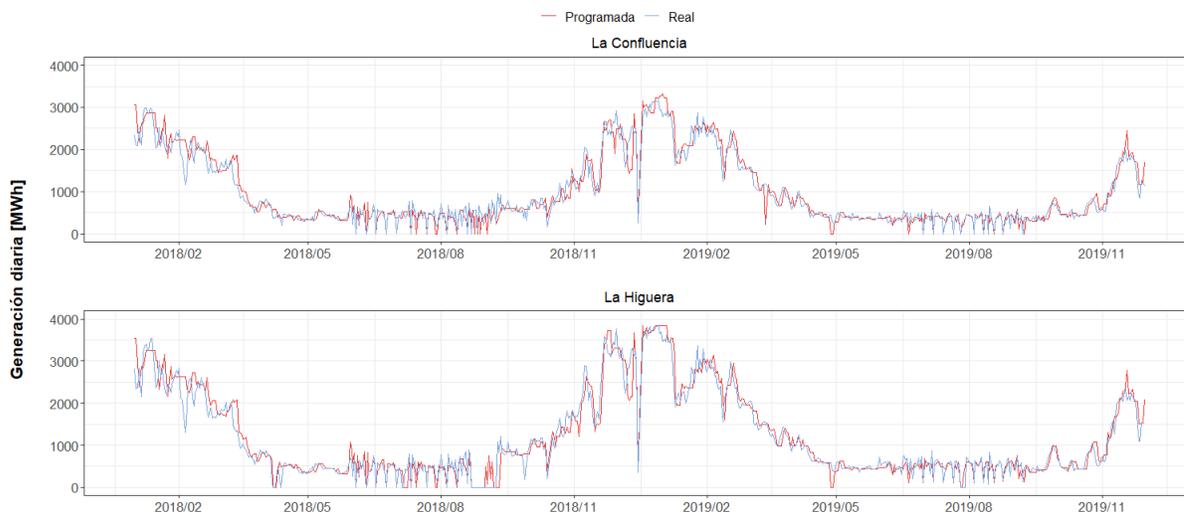


Figura 4.1: Series de generación diaria programada y real para las centrales La Confluencia y La Higuera. Período diciembre 2017 a diciembre 2019.

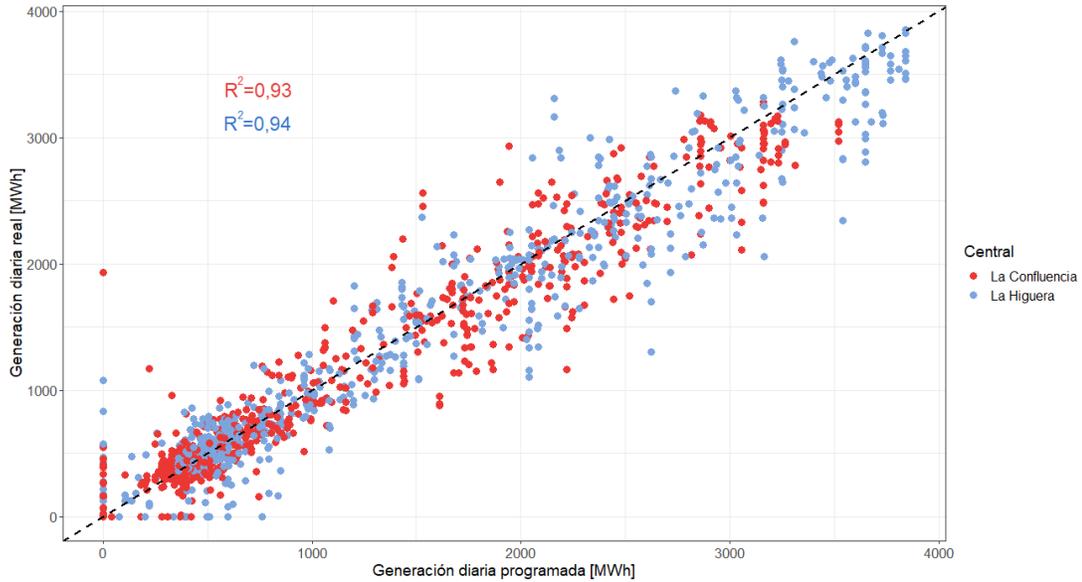


Figura 4.2: Comparación entre la operación real y programada para las centrales La Confluencia y La Higuera. Período diciembre 2017 a diciembre 2019.

4.1.2. Caracterización de los caudales turbinados diarios y horarios

A partir de los datos que entrega el Coordinador Eléctrico Nacional en los reportes de Operación Real de Centrales en su sitio web, se obtienen las series horarias de generación eléctrica de las centrales La Confluencia y La Higuera, desde fines de 2010 hasta mediados de 2020. Estas series permiten caracterizar la operación en términos de variabilidad en el tiempo.

Los coeficientes de rendimiento de las centrales (Tabla 4.1) permiten calcular las series de caudales turbinados a escala horaria desde las series de generación.

Tabla 4.1: Coeficientes de rendimiento de las centrales.

Central	Coef. rendimiento [$MW/(m^3/s)$]
La Confluencia	3,11
La Higuera	3,12

Para analizar la estacionalidad de la operación, las figuras 4.3 y 4.4 indican 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 discontinuas corresponden al promedio de caudal turbinado para cada temporada. Ambas figuras 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 ($50 \text{ m}^3/\text{s}$), mientras que La Higuera lo hace con una frecuencia muy baja. Las figuras muestran que ambas centrales han presentado periodos prolongados de no generación: por ejemplo, en La Higuera casi la totalidad de 2012, y La Confluencia alrededor de seis meses en 2012, atribuible a derrumbes en el túnel de conducción de la central La Higuera.

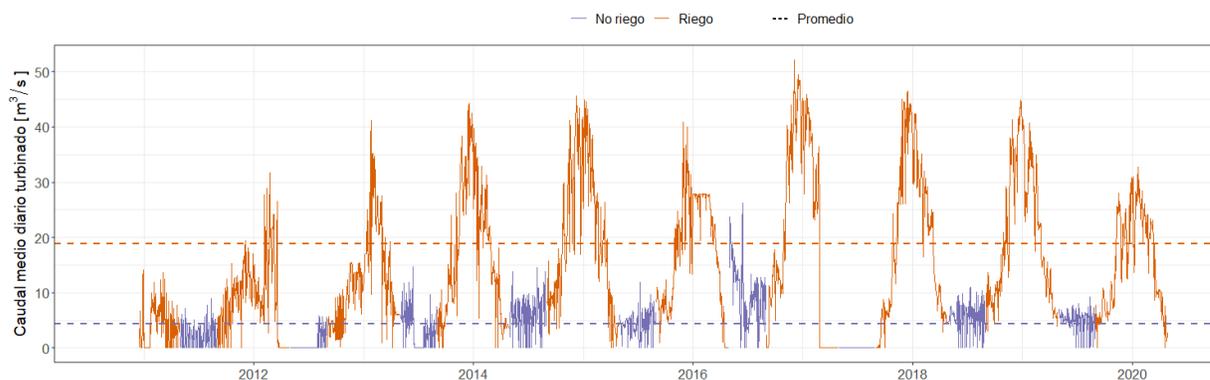


Figura 4.3: Serie de caudales medios diarios turbinados por la central La Confluencia.

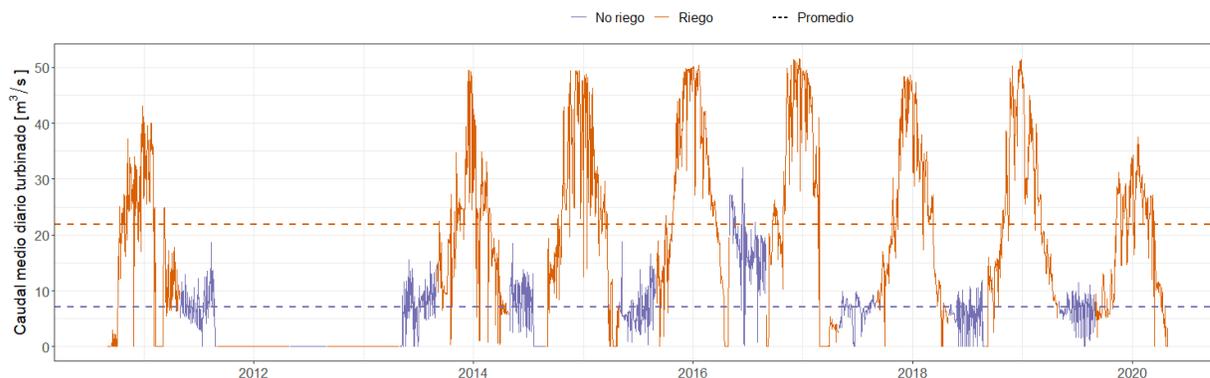


Figura 4.4: Serie de caudales medios diarios turbinados por la central La Higuera.

Las figuras 4.5 y 4.6 muestran el porcentaje del tiempo que las centrales La Confluencia y La Higuera, respectivamente, exceden distintos niveles de generación (en caudal turbinado), según días de la semana. En ambas centrales los niveles de generación muestran una distribución similar de lunes a viernes, mientras que el sábado y, principalmente, el domingo se observan menores niveles de generación eléctrica entre los porcentajes de excedencia 25 y 60, aproximadamente.

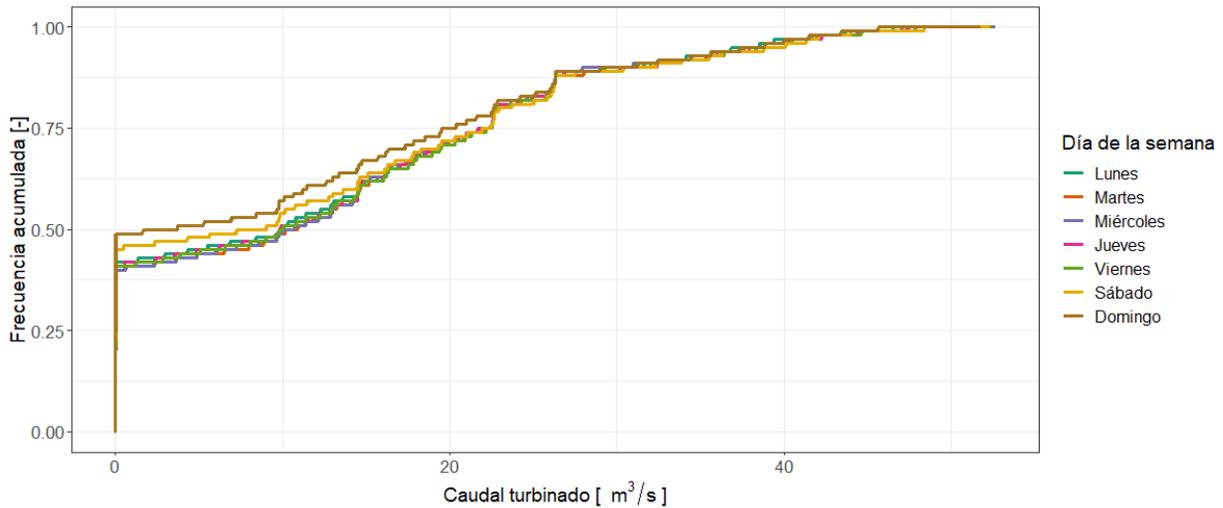


Figura 4.5: Porcentaje del tiempo que la central La Confluencia sobrepasa cierto umbral de generación, según días de la semana.

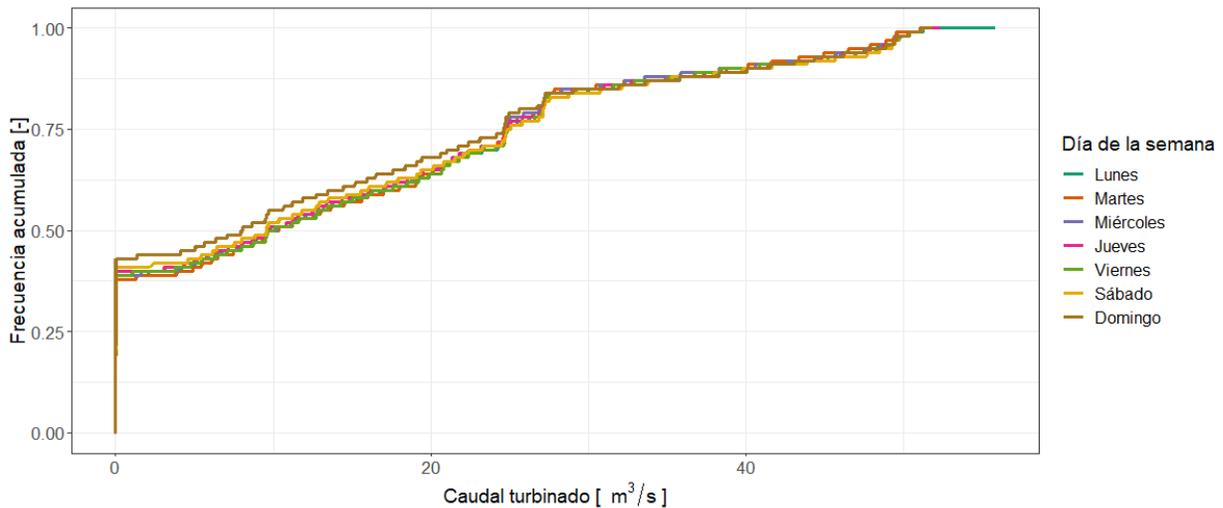


Figura 4.6: Porcentaje del tiempo que la central La Higuera sobrepasa cierto umbral de generación, según días de la semana.

Para identificar patrones en la variabilidad temporal de los caudales se definen dos períodos: una etapa de operación inicial, correspondiente a los primeros años de funcionamiento de las centrales (2011, 2013-14), y una etapa reciente, que incluye la generación de los años 2018-19. Además, se divide el día en dos bloques, según los niveles de demanda que presenta el sistema eléctrico: el horario punta (de 18 a 23 horas) y el horario valle (de 23 a 18 horas). Las figuras 4.7 y 4.8 presentan las curvas de duración de los caudales turbinados por cada central, según el período y bloque horario.

En las figuras 4.7 y 4.8 se observa que los caudales turbinados, en general, para todos los niveles de probabilidad, son superiores para el período reciente en ambas centrales. 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 probabilidades de excedencia superiores al 30 %.

Se constata una operación preferente por parte de las centrales en un horario donde el costo marginal del mercado eléctrico es mayor, acentuándose este fenómeno en el período reciente.

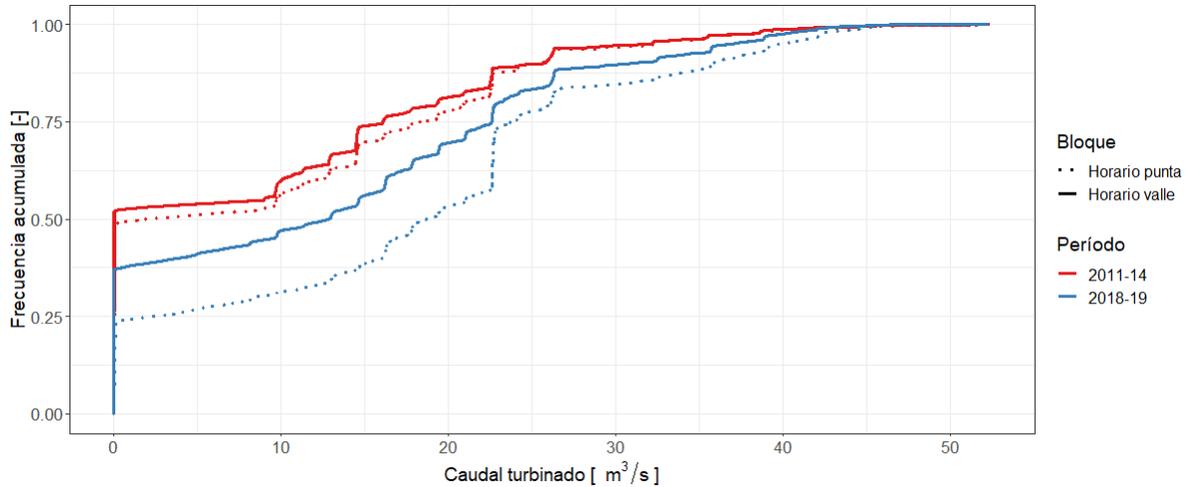


Figura 4.7: Porcentaje del tiempo que el caudal turbinado en La Confluencia para los períodos 2011-14 y 2018-19 supera cierto umbral, según bloque de demanda.

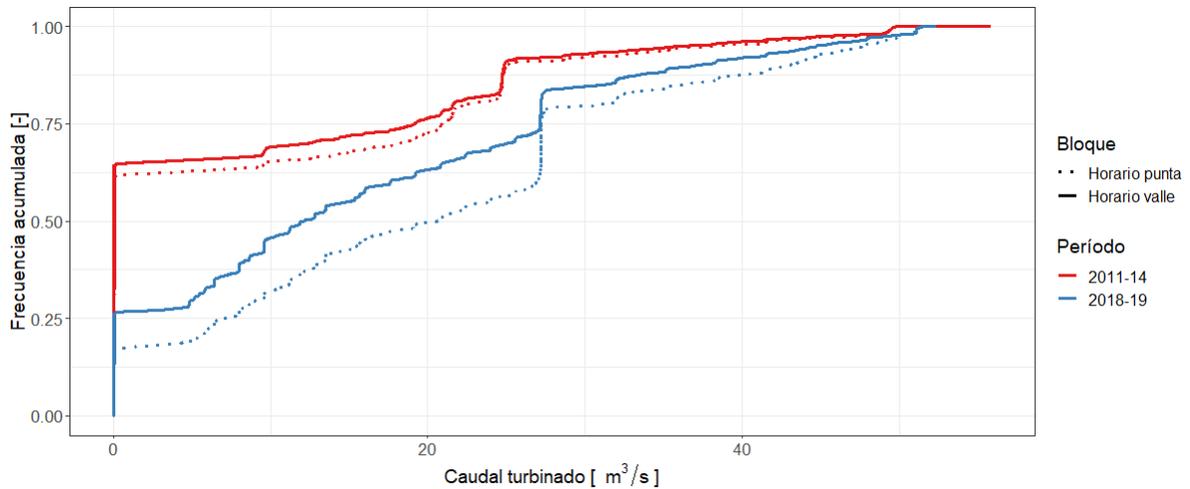


Figura 4.8: Porcentaje del tiempo que el caudal turbinado en La Higuera para los períodos 2011-14 y 2018-19 supera cierto umbral, según bloque de demanda.

Por su parte, las figuras 4.9 y 4.10 indican el caudal medio en cada bloque horario (1 a 24, donde 1, por ejemplo, corresponde al bloque de las 0:00 a 0:59 horas) para los años 2011 al 2019. La temporada de no riego, con niveles de generación inferiores que en riego, muestra dos *peaks* en los caudales medios turbinados: entre los bloques horarios 9 y 13 y entre 18 y

23, aproximadamente, exceptuando los años 2012 (un sólo *peak* entre los bloques 19 a 23) y 2017 (donde no hubo generación eléctrica). A diferencia de La Higuera, en La Confluencia el caudal medio turbinado en época de riego varía notablemente hora a hora, e incluso año a año, presentándose sucesivas crestas y valles, no pudiendo determinarse una tendencia clara relativa a en qué bloques se ha priorizado generar electricidad.

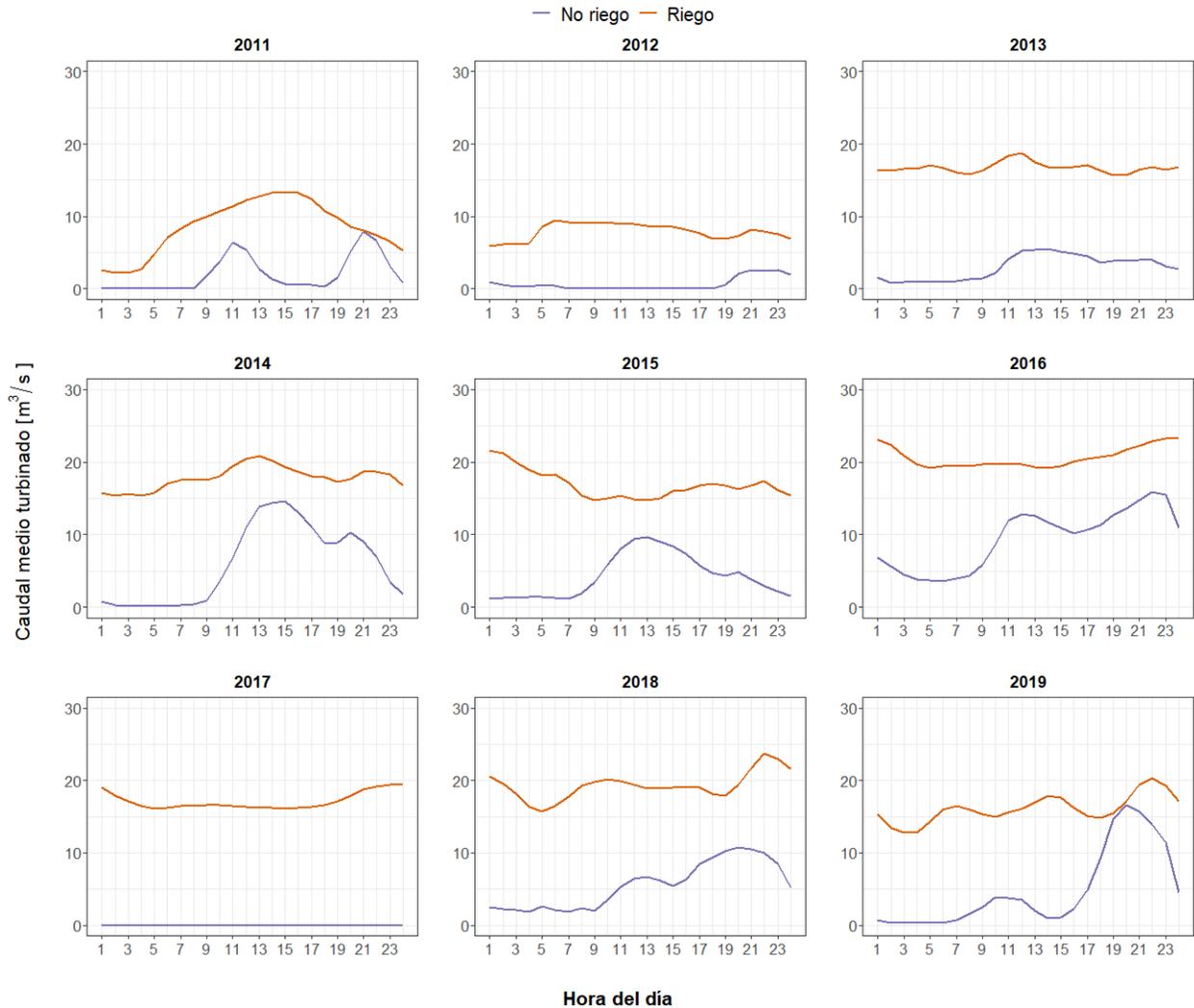


Figura 4.9: Caudal medio [m^3/s] turbinado en la central La Confluencia en cada bloque horario, para las temporadas de riego y no riego.

Debido a la naturaleza misma de las centrales en serie, con una baja capacidad de acumulación, la Figura 4.10 muestra para La Higuera patrones de generación similares a los de La Confluencia. La Higuera evidencia horarios de generación preferentes, principalmente en la temporada de no riego, variando el patrón año a año, pero en general favoreciendo, salvo excepciones, la generación entre los bloques horarios 19 y 23 aproximadamente. De 2011 a 2017 (exceptuando 2012 debido al no funcionamiento de la central) La Higuera muestra un segundo *peak* de generación cercano al mediodía. 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.

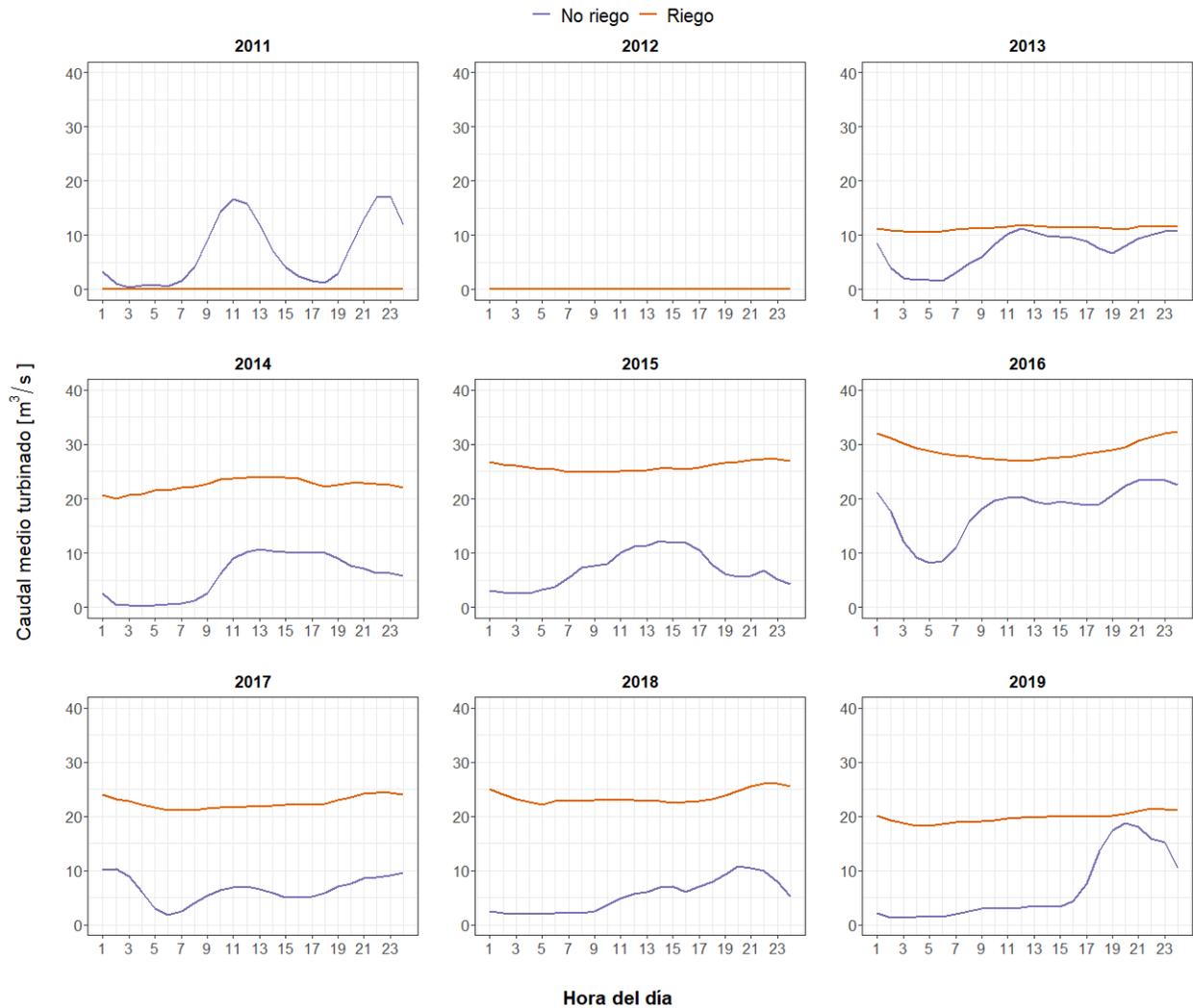


Figura 4.10: Caudal medio [m^3/s] turbinado en la central La Higuera en cada bloque horario, para las temporadas de riego y no riego.

4.2. Impacto de la operación de las centrales en el caudal disponible para riego

4.2.1. Impacto de la operación en los caudales máximos y mínimos diarios

Se analiza el grado de alteración en los valores de caudales máximos y mínimos diarios que genera la operación de La Higuera y La Confluencia mediante las funciones de distribución acumulada (FDA) de estas variables, clasificándose en períodos pre (2000-2010) y post (2011-2019) inicio de operación de centrales. La Figura 4.11 muestra la FDA de los caudales máximos diarios en la estación Tinguiririca bajo Los Briones. Para la temporada de no riego, en general, hay una disminución de los caudales máximos desde el hito hidro-

lógico, exceptuando los valores cercanos a $25 \text{ m}^3/\text{s}$, alcanzándose con una mayor frecuencia desde el inicio de operación de las centrales. En el caso de la temporada de riego, se indica una disminución general de los caudales máximos, de la mano de una dispersión levemente inferior y una disminución en la frecuencia de caudales en extremo altos (mayores que $Q_{max-diario} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$).

Para los caudales mínimos (Figura 4.12) se observa un patrón análogo, donde tanto el valor medio como la desviación estándar disminuyen de un período a otro. La temporada de no riego presenta una alta concentración de registros entre los 0 y $15 \text{ m}^3/\text{s}$ en el período 2011-2019, con un promedio cercano a un tercio al de la etapa anterior. En riego se presenta una situación similar, aunque los datos muestran una mayor dispersión en 2011-2019 comparado con la otra temporada. Para ambas el número de registros de caudal mínimo en extremo bajo aumenta, mientras que los eventos en altos (mayores a $25 \text{ m}^3/\text{s}$ en no riego y a $50 \text{ m}^3/\text{s}$ en riego) disminuyen considerablemente.

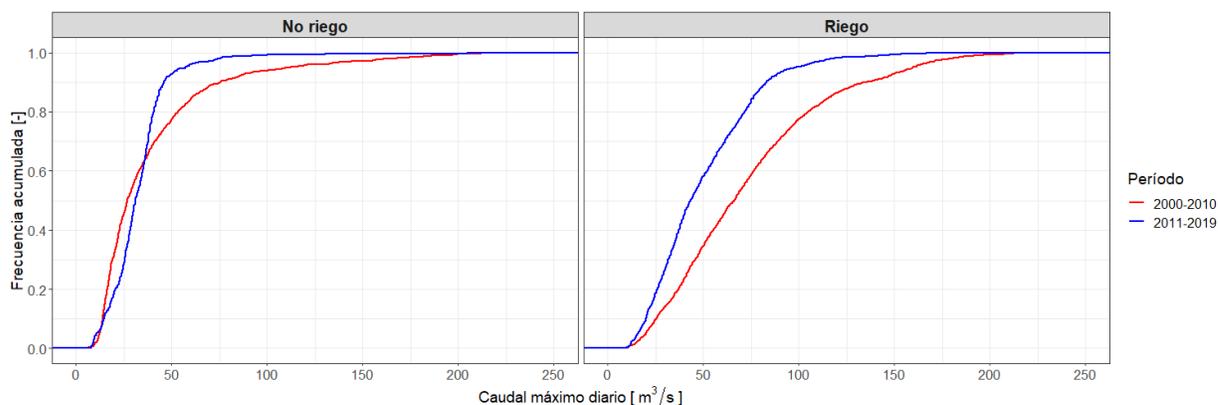


Figura 4.11: Frecuencia acumulada de caudales máximos diarios para la estación Tinguiririca bajo Los Briones, según temporada.

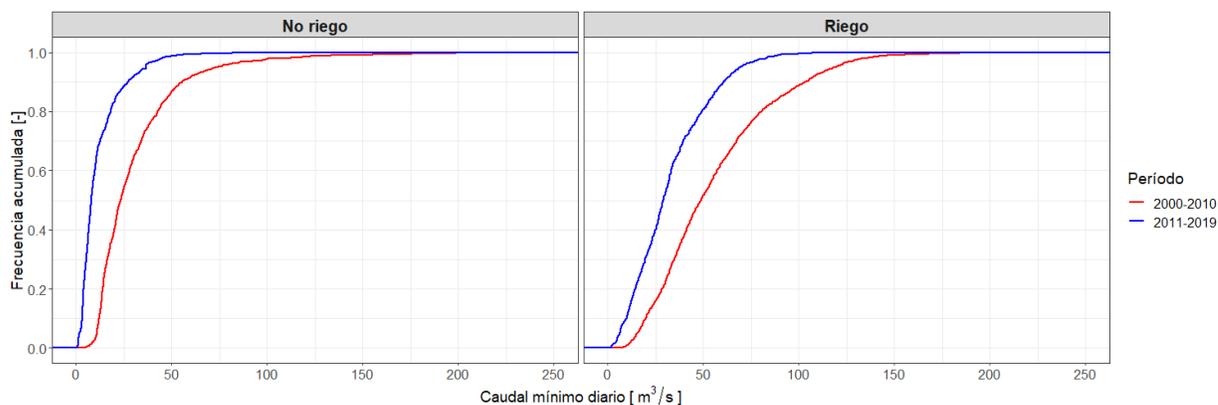


Figura 4.12: Frecuencia acumulada de caudales mínimos diarios para la estación Tinguiririca bajo Los Briones, según temporada.

A modo de comparación con el caudal en Bajo Los Briones, las figuras 4.13 y 4.14 muestran la curva de frecuencia acumulada de caudales máximos y mínimos diarios turbinados por la

central La Higuera. La Figura 4.13 muestra alrededor de un 20 % de valores máximos cercanos o iguales a cero para ambas temporadas, lo que indica una cantidad considerable de días donde La Higuera no opera. Además, ambas temporadas muestran dos zonas donde se concentran los caudales máximos diarios: en las proximidades de 10 y 30 m^3/s para la temporada de no riego, y entre 25 y 50 m^3/s para la de riego. La Figura 4.14 indica que casi la totalidad de días (93 %) presentan al menos un bloque horario sin generación en la temporada de no riego, mientras que en la de riego solo es del 41 %. Para la temporada de riego la figura indica un rango mayor de caudales mínimos diarios, con una distribución relativamente uniforme entre los 5 y 30 m^3/s , alcanzando incluso valores cercanos al caudal de diseño de las centrales.

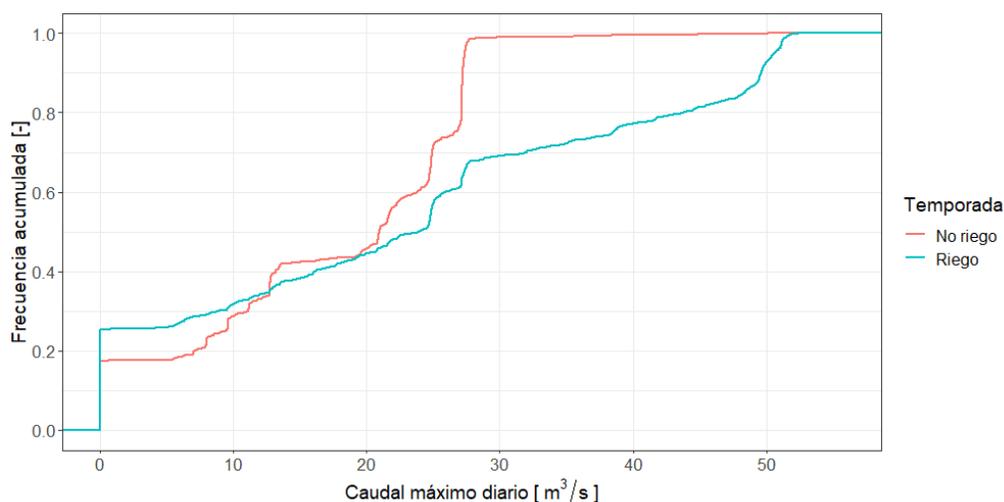


Figura 4.13: Frecuencia acumulada de caudales máximos diarios turbinados por la central La Higuera, según temporada. Período 2011-2019

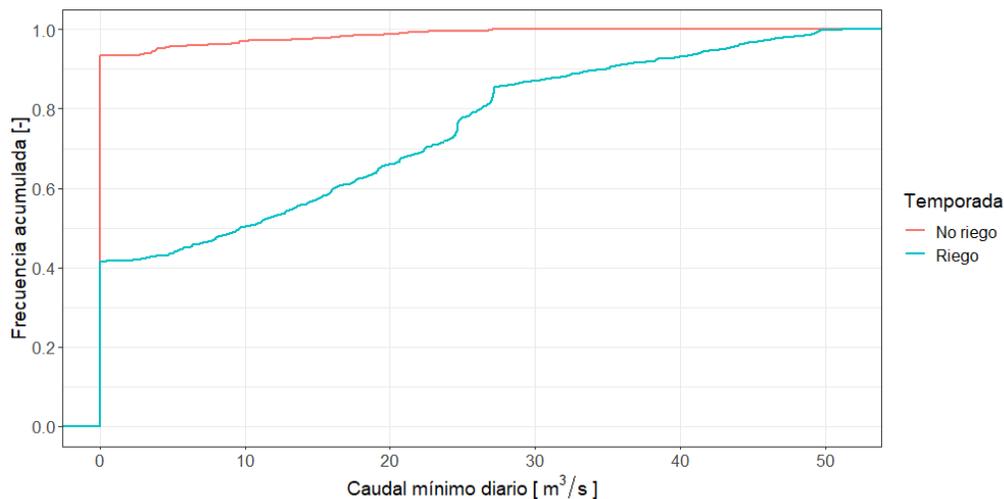


Figura 4.14: Frecuencia acumulada de caudales mínimos diarios turbinados por la central La Higuera, según temporada. Período 2011-2019

Las tablas 4.2 y 4.3 sintetizan el promedio (\bar{x}) y desviación estándar (s) de los caudales máximos y mínimos, respectivamente, registrados en la estación Tinguiririca Bajo Los Briones (LB), pre y post operación de las centrales, y los turbinados por la central La Higuera (LH).

Tabla 4.2: Promedio y desviación estándar del caudal máximo diario, en m^3/s , para Tinguiririca bajo Los Briones y los turbinados por La Higuera.

Temporada	LB: 2000-2010		LB: 2011-2019		LH: 2011-2019	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
No riego	49,2	79,3	34,8	48,4	17,0	10,3
Riego	75,7	48,8	51,0	43,8	22,5	18,0

Tabla 4.3: Promedio y desviación estándar del caudal mínimo diario, en m^3/s , para Tinguiririca Bajo Los Briones y los turbinados por La Higuera.

Temporada	LB: 2000-2010		L.B: 2011-2019		LH: 2011-2019	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
No riego	31,3	27,5	12,0	11,9	0,7	3,4
Riego	55,8	32,3	32,8	22,1	13,4	14,4

4.2.2. Frecuencia y duración de pulsos de caudal en Tinguiririca Bajo Los Briones

En base al procedimiento empleado en Archer y Newson (2002) para caracterizar alteración hidrológica a nivel horario, se cuantifica el número de veces que la serie de caudales superó los umbrales de una, tres y cinco veces la mediana del caudal horario (1M, 3M y 5M, respectivamente), así como el 90% del caudal de diseño de las centrales, en el período de un año. La Figura 4.15 muestra la variación en los últimos 20 años en la cantidad de episodios de flujos de distinta magnitud en los caudales registrados en Tinguiririca bajo Los Briones (Anexo A, Tabla A.1). Para este método se omiten los datos del año 2009 debido a la falta de datos durante esta temporada.

El gráfico de la Figura 4.15 muestra un aumento general en el número de pulsos por año durante el período posterior a la entrada en operación de las centrales, para los umbrales más bajos, es decir, 1M y 90% del caudal de diseño de La Higuera. Por otro lado, los umbrales 3M y 5M evidencian una disminución en la frecuencia desde 2011 a la fecha.

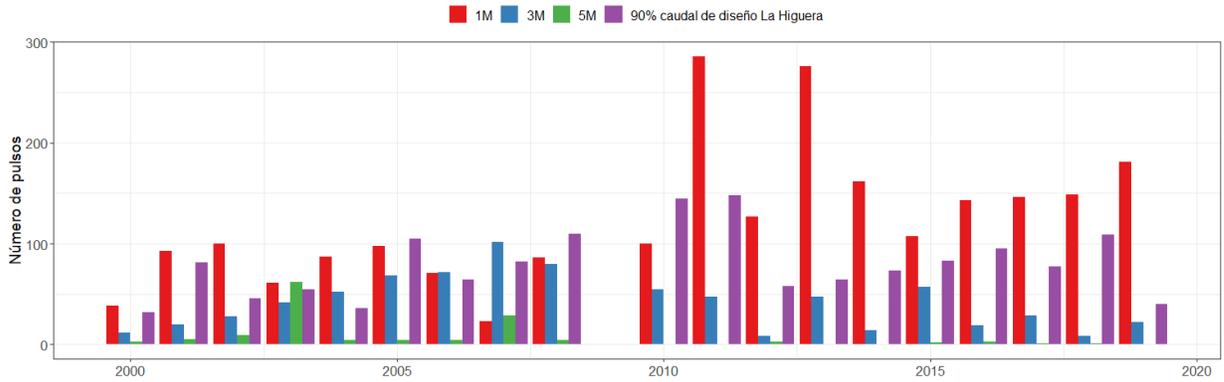


Figura 4.15: Variación en el tiempo del número de pulsos anuales registrados para 1M, 3M, 5M y el 90 % del caudal de diseño de La Higuera, en Tinguiririca bajo Los Briones.

De manera complementaria al análisis del número de pulsos, se obtiene la duración media de pulsos para cada umbral (Anexo A, Tabla A.2). La Figura 4.16 registra el tiempo medio en el que el caudal superó cierto umbral cada año. Según muestra esta figura, se observa un descenso notable en la duración media de pulsos para los cuatro umbrales considerados desde el inicio de operación de las centrales, exceptuando el umbral 5M en 2016.

Empleando esta misma metodología, se compara la variación en los caudales en dos períodos: un período previo a la operación de las centrales (2000 a 2010) y el período de operación (2011 a 2019). La Figura 4.17 señala cantidad media anual de pulsos sobre cada umbral para los períodos indicados (Anexo A, Tabla A.3). El gráfico muestra un aumento en la cantidad de pulsos bajos (0.1M a 1M), así como un leve descenso en el número de pulsos medios y altos (2M a 10M). Para ambos períodos las curvas presentan un máximo global: para 2000-10 se alcanza en una frontera cerca al umbral 2M, mientras que para 2011-19 en torno a 0,5M.

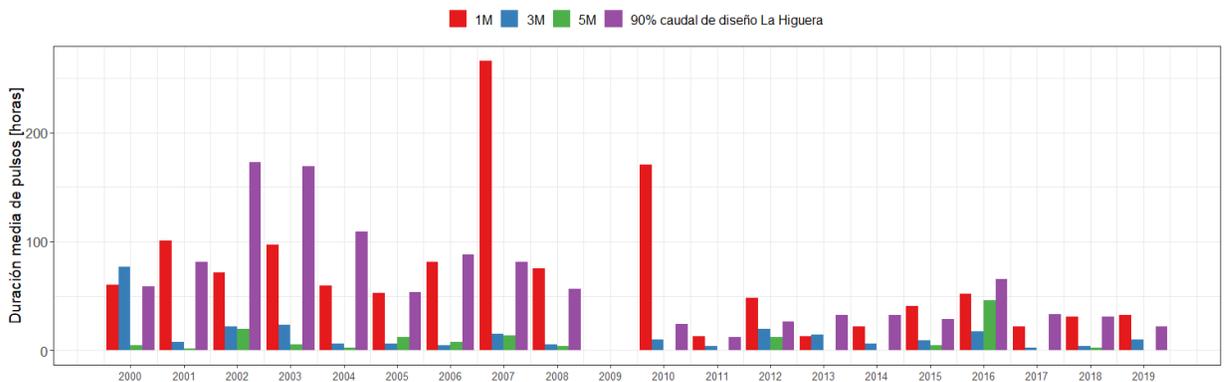


Figura 4.16: Duración media de pulsos (en horas) para los umbrales 1M, 3M, 5M y 90 % del caudal de diseño de La Higuera.

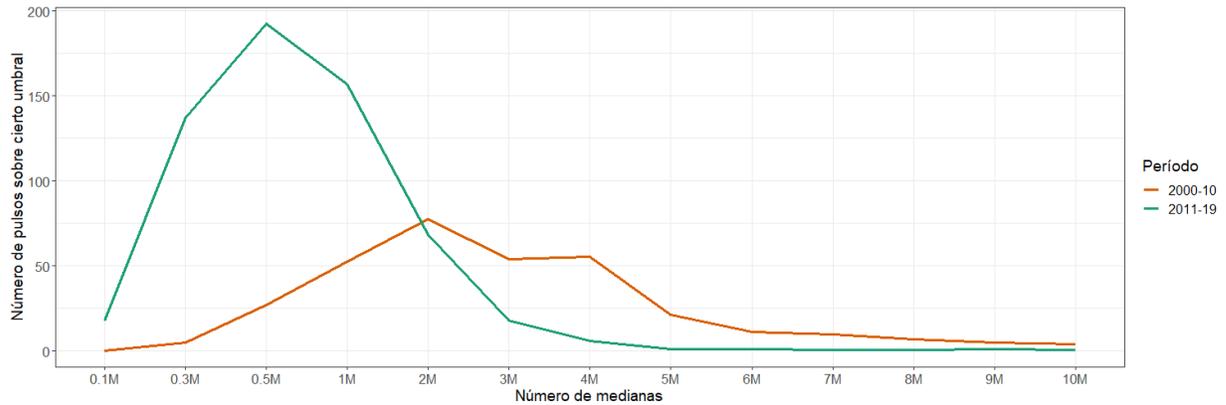


Figura 4.17: Media de pulsos al año sobre cada umbral para los períodos 2000-10 y 2011-19, en Tinguiririca bajo Los Briones.

En síntesis, el método de pulsos de caudales (Archer y Newson, 2002) evidencia que los caudales en Tinguiririca bajo Los Briones han presentado un aumento en la cantidad de pulsos bajos y medios bajos desde el inicio de operaciones de las centrales La Confluencia y La Higuera, así como una disminución en los pulsos altos y medios altos desde el inicio de operación de las centrales. Además, para los distintos umbrales la tendencia señala una disminución clara en su duración media, concordante con una regulación del caudal a fin de favorecer la generación eléctrica en ciertos bloques horarios.

4.2.3. Índices de fluctuación intradiaria del caudal en río Tinguiririca bajo Los Briones

Zimmerman *et al.* (2010) emplea cuatro métricas para estudiar la variación del flujo a nivel subdiario: el índice de Richards-Baker (RBF), *Reversals* (NREVS), el porcentaje del flujo total (PTF) y el coeficiente de variación (CDV). Estas métricas toman como entrada caudales a nivel horario, generando un valor del índice para cada período de 24 horas. Para estudiar la alteración hidrológica a escala horaria en Tinguiririca bajo Los Briones se emplean los índices RBF, PTF y CDV, además del Rango dial de caudales (RDC).

La Figura 4.18 muestra en un diagrama de caja los valores de RBF a nivel intradiario para Río Tinguiririca bajo Los Briones, en el período 2000-2019. El RBF presenta un valor medio y dispersión relativamente fijos durante 2001 a 2010 para ambas temporadas, y posterior al comienzo del funcionamiento de las centrales (2011 en adelante) se observa un leve aumento en ambos atributos, principalmente en la temporada de no riego.

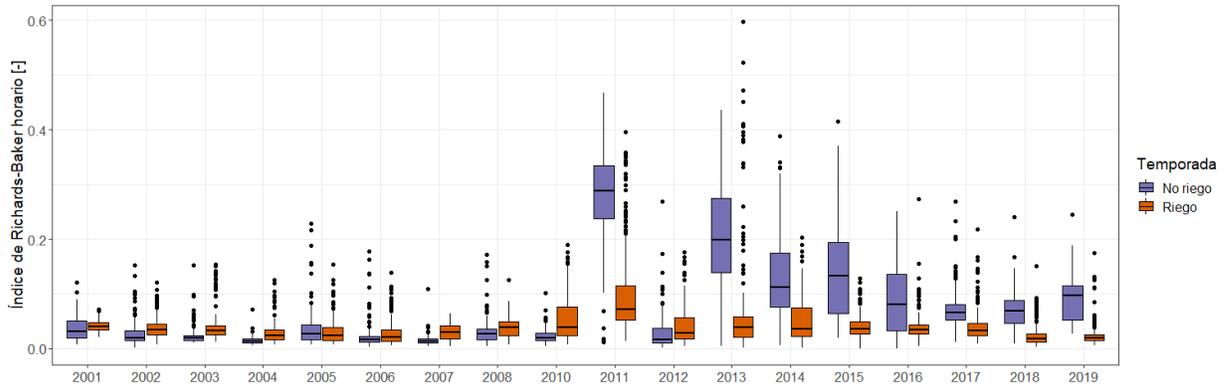


Figura 4.18: Valores del índice de Richards-Baker a nivel intradiario para Tinguiririca bajo Los Briones.

El rango diario de caudales (RDC), de igual modo, se presenta en un diagrama de caja en la Figura 4.19. Acorde a la figura, existe una ligera tendencia al aumento en el rango promedio de caudales dentro del día para las temporadas de no riego desde la puesta en marcha de las centrales, acompañado de un aumento en la dispersión de este indicador. Para la temporada de riego no se observa una tendencia clara.

La Figura 4.20 muestra un aumento en el índice PTF para ambas temporadas, desde 2011. Existe un aumento en la frecuencia de valores extremos, con días en los que el rango es considerablemente superior al caudal medio diario ($PTF \approx 0,0417$), viéndose este fenómeno acentuado en los meses de no riego.

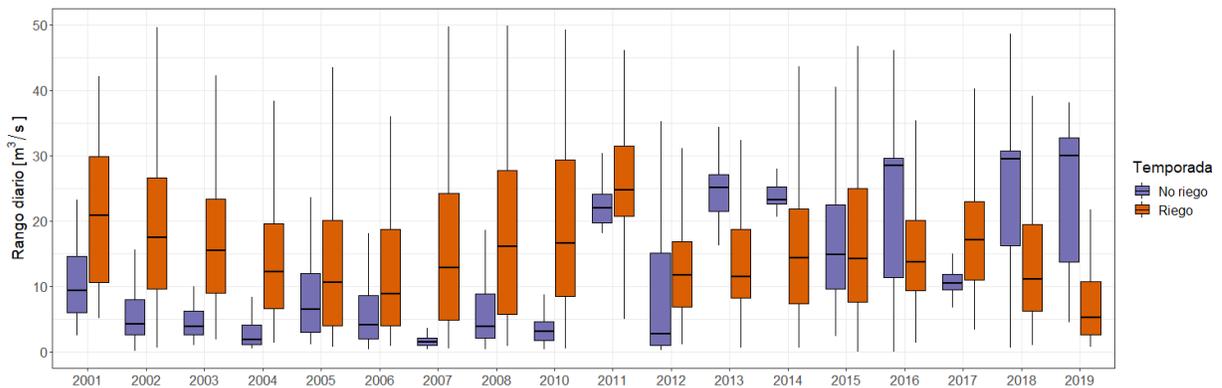


Figura 4.19: Rango diario de caudales en Tinguiririca bajo Los Briones, para el período 2000-2019.

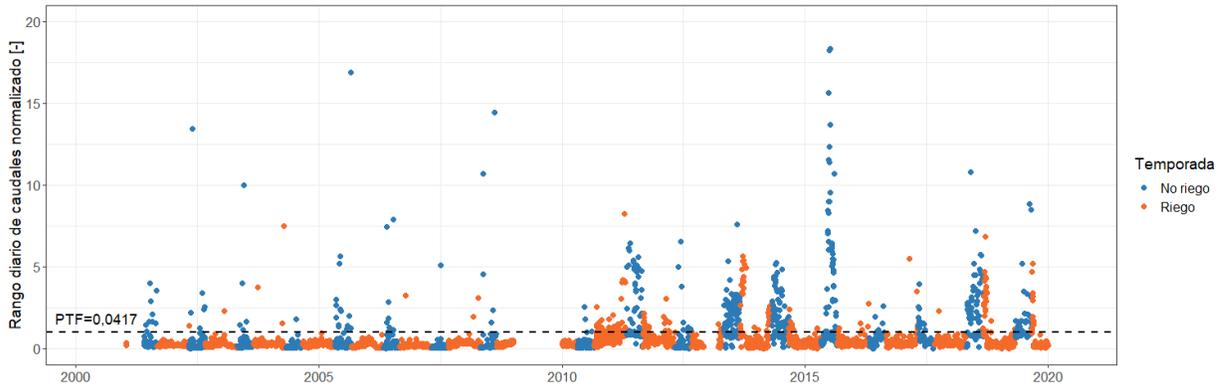


Figura 4.20: Rango diario de caudales normalizado por el caudal medio diario, en Tinguiririca bajo Los Briones.

La Figura 4.21 muestra el coeficiente de variación intradiaria de los caudales en Río Tinguiririca bajo Los Briones. Se evidencia valores superiores de CDV, y de la dispersión de este índice, 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 atribuible a acuerdos entre la empresa generadora y los usuarios de riego.

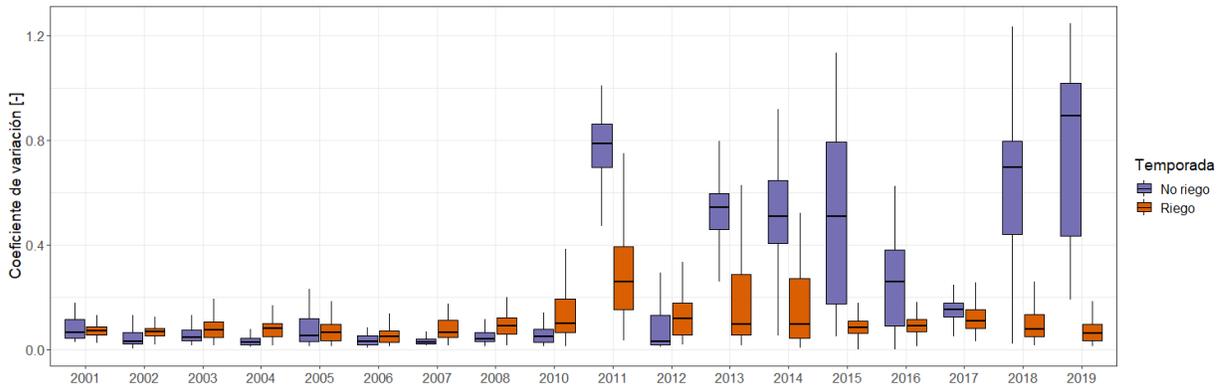


Figura 4.21: Coeficiente de variación del flujo para períodos de 24 horas, para el período 2000-2019. Río Tinguiririca bajo Los Briones.

La Figura 4.22 presenta las curvas de duración de los indicadores RBF, PTF y CDV en Tinguiririca Bajo Los Briones para los registros previos y durante el funcionamiento de las centrales, para ambas temporadas. Las líneas punteadas indican probabilidades de excedencia de 0,1 y 0,9.

En términos generales, se muestra un aumento en los tres indicadores, en ambas temporadas, de un período a otro, para la misma probabilidad de excedencia. La separación entre las curvas de cada período se acentúa en los cuadros de 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). El índice PTF, función del rango diario de caudales, no experimenta cambios notorios comparado a las otras dos métricas, lo que se explica a causa de que la regulación intradiaria del caudal para generación hidroeléctrica no produce caudales máximos diarios elevados y, con ello, no induce valores elevados de rango.

Para el período donde operan las centrales se presentan valores muy altos de RBF (ambas temporadas), PTF (ambas temporadas) y CDV (temporada de riego), aunque con una frecuencia baja (inferior al 2% del tiempo). Para los valores en extremo bajos de las tres métricas (probabilidad de excedencia mayor al 90%) no se observa un cambio notable en la frecuencia de un período a otro.

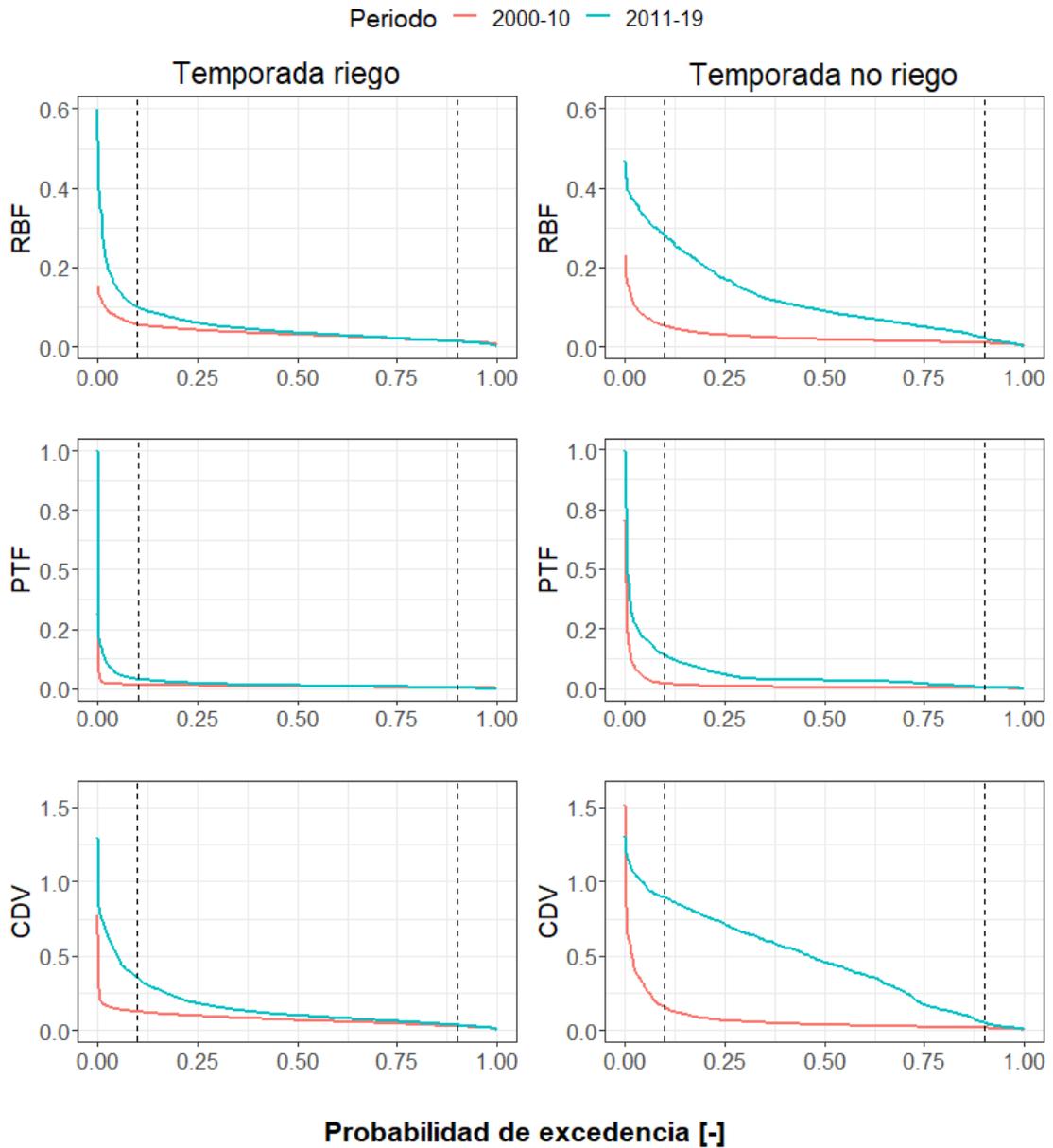


Figura 4.22: Curvas de duración en Tinguiririca Bajo Los Briones de RBF, PTF y CDV que comparan los periodos pre y post inicio de operación de las centrales en temporada de riego y no riego.

Los valores medios (\bar{x}) y desviación estándar (s) del RBF, PTF y CDV para los caudales de Tinguiririca bajo Los Briones para cada año, de 2001 a 2019, según temporada, se resumen en las tablas 4.4 y 4.5.

Tabla 4.4: Resumen de índices de alteración hidrológica a nivel intradiario para Río Tinguiririca bajo Los Briones. Temporada de no riego.

Año	RBF		PTF		CDV	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
2001	0,037	0,023	0,016	0,016	0,110	0,120
2002	0,029	0,026	0,010	0,014	0,069	0,099
2003	0,024	0,019	0,011	0,012	0,081	0,104
2004	0,015	0,008	0,006	0,006	0,039	0,039
2005	0,039	0,041	0,019	0,029	0,126	0,194
2006	0,025	0,031	0,012	0,022	0,080	0,162
2007	0,016	0,010	0,006	0,008	0,040	0,063
2008	0,034	0,030	0,013	0,023	0,089	0,159
2010	0,023	0,014	0,010	0,009	0,066	0,065
2011	0,279	0,086	0,082	0,023	0,747	0,181
2012	0,030	0,037	0,017	0,027	0,116	0,183
2013	0,204	0,098	0,058	0,017	0,515	0,143
2014	0,132	0,077	0,055	0,020	0,514	0,175
2015	0,139	0,089	0,059	0,037	0,503	0,313
2016	0,089	0,062	0,031	0,018	0,254	0,169
2017	0,073	0,041	0,024	0,012	0,171	0,082
2018	0,070	0,032	0,097	0,058	0,637	0,229
2019	0,091	0,039	0,100	0,047	0,776	0,301

Tabla 4.5: Resumen de índices de alteración hidrológica a nivel intradiario para Río Tinguiririca bajo Los Briones. Temporada de riego.

Año	RBF		PTF		CDV	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
2001	0,041	0,009	0,011	0,004	0,110	0,120
2002	0,040	0,020	0,011	0,005	0,069	0,099
2003	0,040	0,028	0,013	0,008	0,081	0,104
2004	0,029	0,019	0,012	0,007	0,039	0,039
2005	0,031	0,023	0,010	0,006	0,126	0,194
2006	0,031	0,025	0,009	0,010	0,080	0,162
2007	0,030	0,014	0,011	0,006	0,040	0,063
2008	0,039	0,018	0,014	0,008	0,089	0,159
2010	0,054	0,040	0,021	0,016	0,066	0,065
2011	0,102	0,080	0,038	0,019	0,747	0,181
2012	0,041	0,035	0,020	0,016	0,116	0,183
2013	0,081	0,118	0,024	0,023	0,515	0,143
2014	0,050	0,039	0,020	0,015	0,514	0,175
2015	0,039	0,022	0,014	0,009	0,503	0,313
2016	0,039	0,024	0,016	0,021	0,254	0,169
2017	0,040	0,028	0,020	0,022	0,171	0,082
2018	0,024	0,021	0,020	0,022	0,637	0,229
2019	0,024	0,020	0,017	0,032	0,776	0,301

4.2.4. Operación horaria de las centrales en días de alto RBF

Con el fin de analizar el impacto de la operación de las centrales en el caudal de la primera sección del río Tinguiririca, se comparan las series horarias de caudales turbinados por las centrales con la de Tinguiririca bajo Los Briones, para una selección de días según el valor del índice de Richards-Baker (RBF) en la estación. Para ambas temporadas se determinan los valores de RBF pertenecientes a los percentiles 95 y 75, donde para cada uno, en las figuras 4.23 y 4.24 se indican cinco días para el análisis (en negro), junto a las 24 horas previas (línea discontinua azul).

No existe un patrón fijo de operación horaria para los días con alto RBF en época de riego (Figura 4.23). Sin embargo, se manifiesta una preferencia por la generación entre los bloques 13 y 21, presentando uno o dos *peaks* por día. En Tinguiririca bajo Los Briones es posible notar el efecto de las centrales en el hidrograma, como la propagación de un pulso con un desfase aproximado de entre dos y tres horas. La mayoría de los ejemplos de las figuras 4.23 y 4.24 presentan patrones de generación similares entre días consecutivos, con excepciones como el caso 5a de la figura 4.24.

El ejemplo 1a de la Figura 4.23 muestra que, a pesar de no operar la central La Higuera

dicho día, de todas formas la acción individual de La Confluencia repercute en el hidrograma de Tinguiririca bajo Los Briones. Esta situación se repite en los ejemplos de la temporada de riego, esta vez no operando La Confluencia, en los ejemplos b y c de la Figura 4.24.

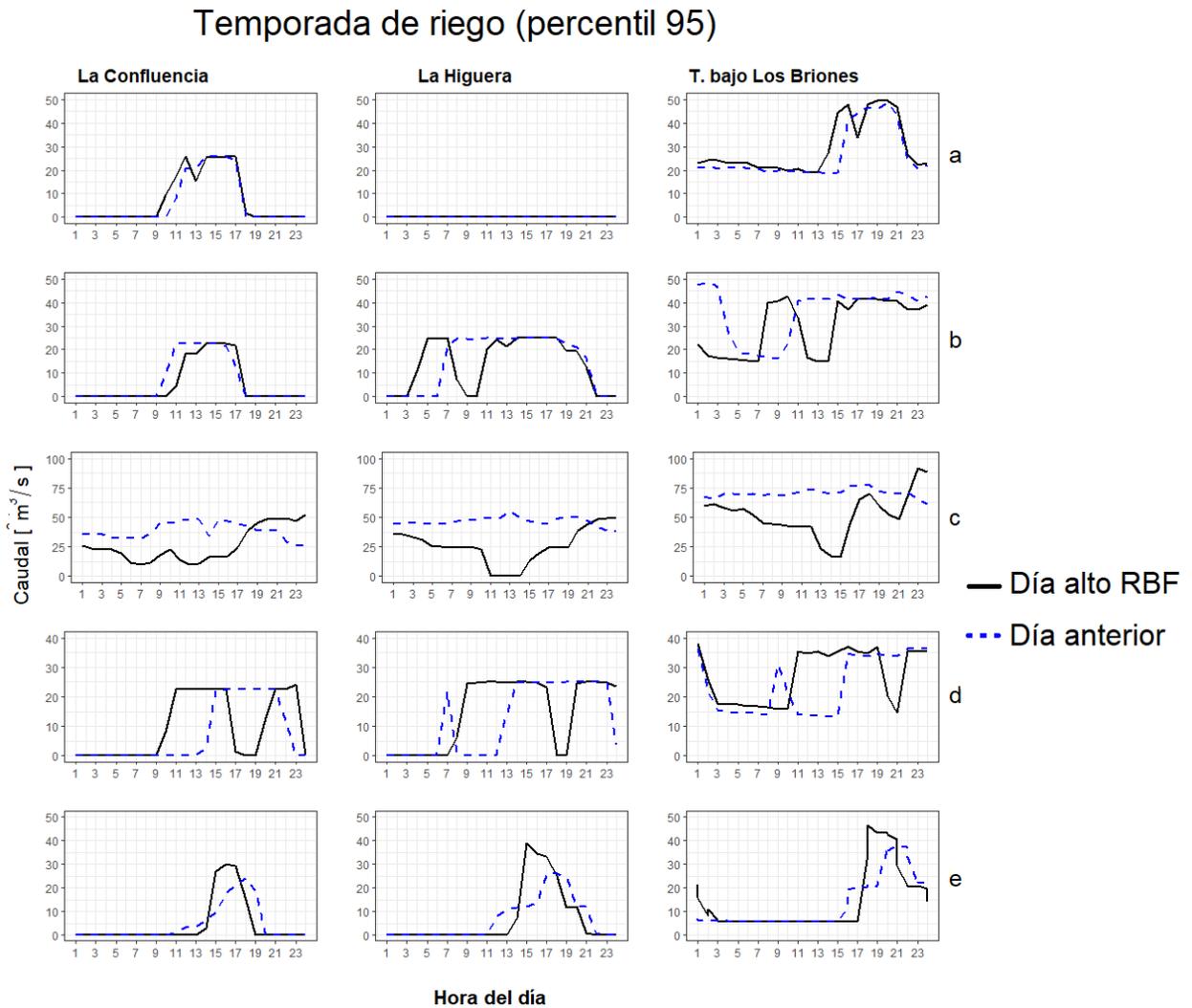


Figura 4.23: Comparación de caudal turbinado por La Higuera y La Confluencia con el registrado en T. bajo Los Briones, en días con RBF pertenecientes al percentil 95. Temporada de riego.

Temporada de no riego (percentil 95)

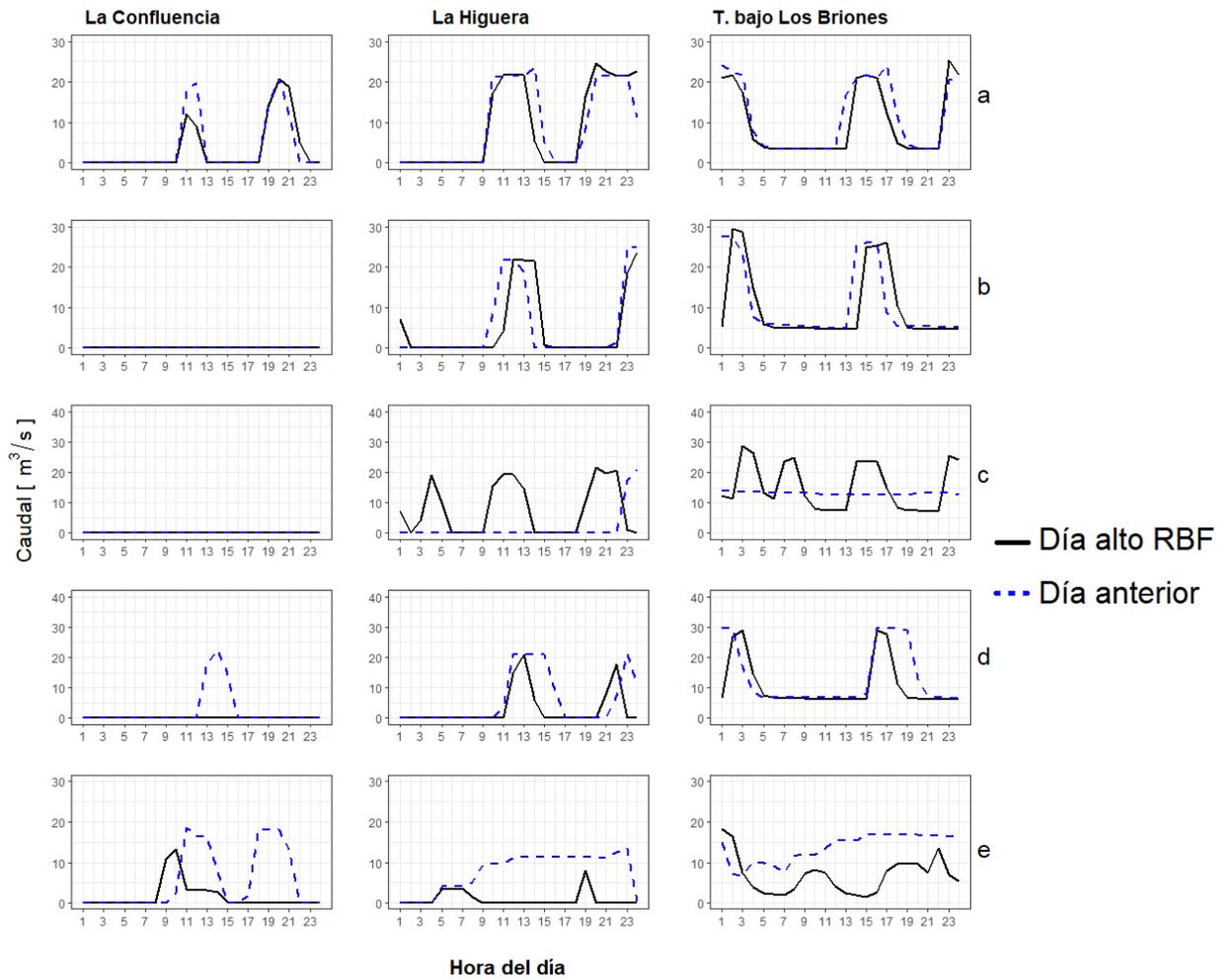


Figura 4.24: Comparación de caudal turbinado por La Higuera y La Confluencia con el registrado en T. bajo Los Briones, en días con RBF pertenecientes al percentil 95. Temporada de no riego.

Tabla 4.6: Selección de días RBF con percentil 95 en Tinguiririca Bajo Los Briones.

Temporada	Etiqueta	Fecha	RBF	CDV	PTF
Riego	a	21-09-2011	0,133	0,379	0,056
	b	04-09-2013	0,139	0,387	0,052
	c	17-12-2013	0,137	0,348	0,053
	d	16-09-2014	0,138	0,336	0,026
	e	05-09-2019	0,131	0,944	0,080
No riego	a	20-05-2011	0,328	0,832	0,043
	b	17-07-2011	0,326	0,878	0,196
	c	02-07-2013	0,320	0,504	0,072
	d	06-07-2014	0,320	0,767	0,149
	e	11-06-2015	0,323	0,662	0,038

Los valores del percentil 75 de Richard-Baker en Bajo Los Briones evidencian una marcada discrepancia entre ambas temporadas. Para la temporada de riego los caudales son relativamente estables dentro del día, con patrones de operación que se ven reflejados en los registros de la estación fluviométrica aguas abajo. En la temporada de no riego, en cambio, se presentan notorias fluctuaciones, con una operación por bloque en el horario cercano al mediodía en ambas centrales, con una duración aproximada de entre 4 y 8 horas.

Nuevamente, para ambas centrales los ejemplos de las figuras 4.25 y 4.26 indican esquemas de operación similares entre días consecutivos, que traen como consecuencia un nivel análogo de alteración hidrológica reportado en la estación.

Temporada de riego (percentil 75)

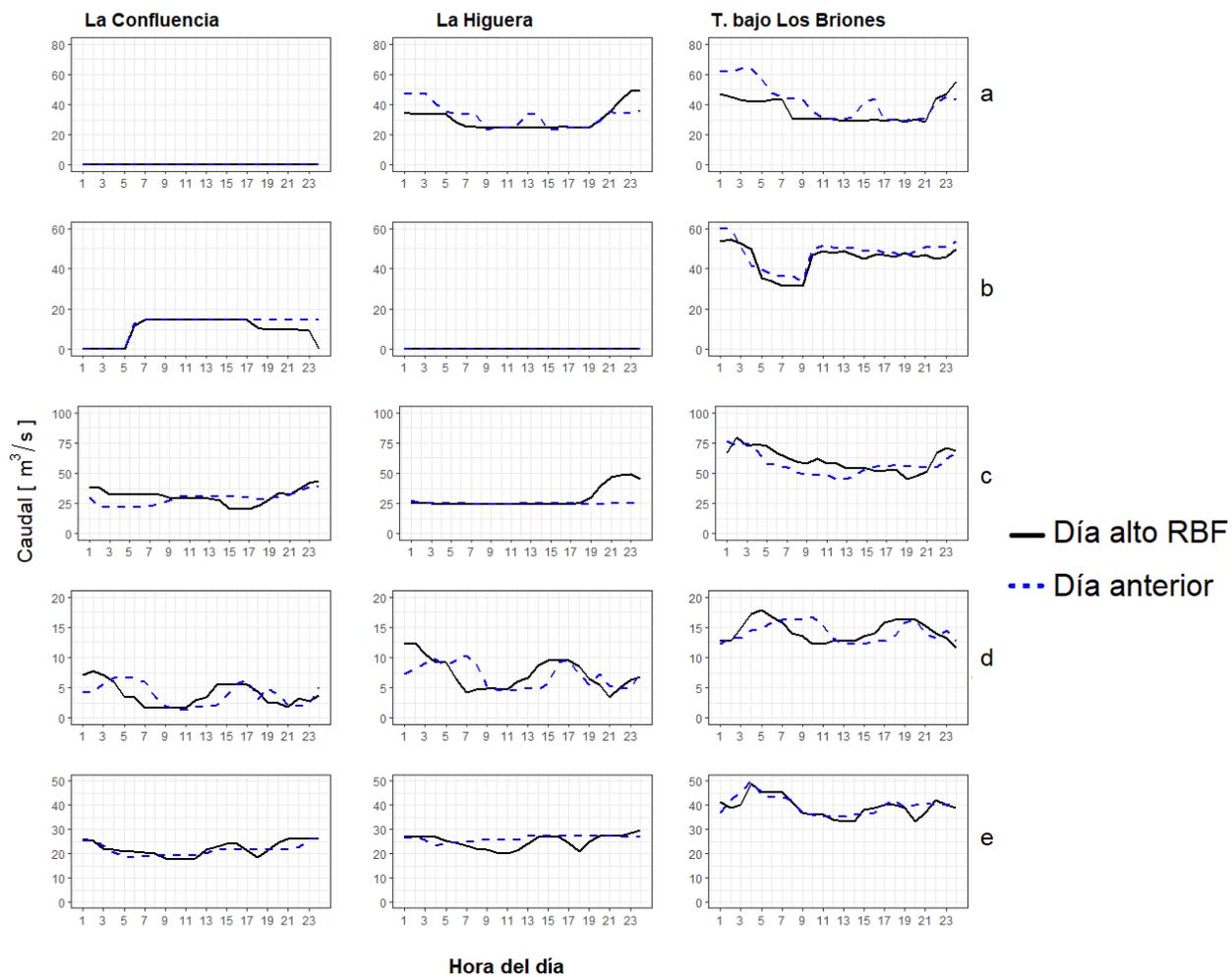


Figura 4.25: Comparación de caudal turbinado por La Higuera y La Confluencia con el registrado en T. bajo Los Briones, en días con RBF pertenecientes al percentil 75. Temporada de riego.

Temporada de no riego (percentil 75)

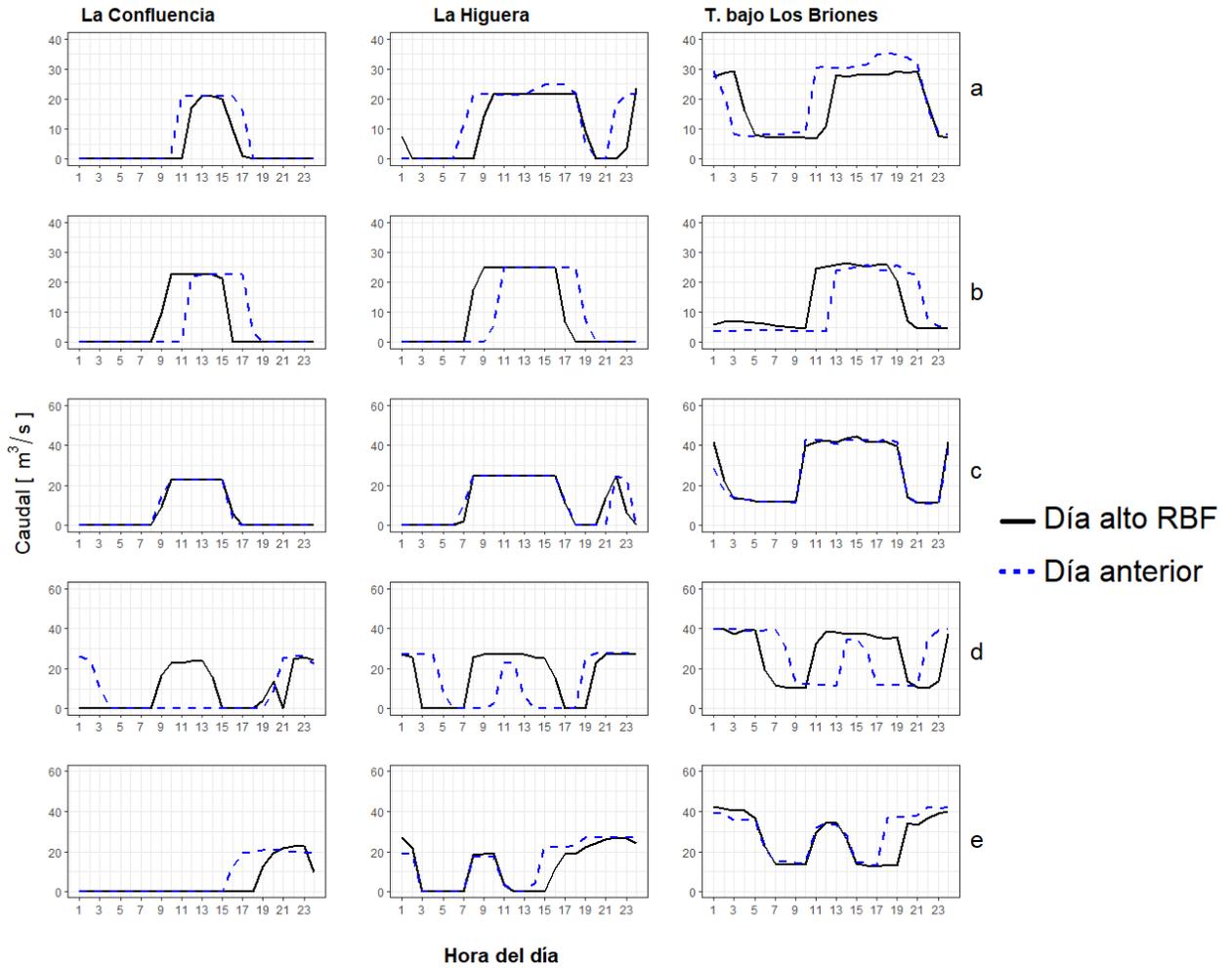


Figura 4.26: Comparación de caudal turbinado por La Higuera y La Confluencia con el registrado en T. bajo Los Briones, en días con RBF pertenecientes al percentil 75. Temporada de no riego.

Tabla 4.7: Selección de días RBF con percentil 75 en Tinguiririca Bajo Los Briones.

Temporada	Etiqueta	Fecha	RBF	CDV	PTF
Riego	a	05-01-2011	0,054	0,221	0,024
	b	19-11-2011	0,054	0,221	0,024
	c	29-01-2015	0,055	0,149	0,021
	d	28-04-2015	0,054	0,124	0,021
	e	05-03-2016	0,054	0,102	0,016
No riego	a	19-08-2011	0,157	0,527	0,034
	b	31-07-2015	0,156	0,730	0,158
	c	18-08-2015	0,158	0,531	0,033
	d	18-07-2016	0,158	0,443	0,031
	e	31-07-2016	0,157	0,422	0,029

Capítulo 5

Compatibilización de la generación hidroeléctrica con el uso del agua para riego

5.1. Caracterización de esquemas preferentes para el uso de riego

Con el fin de avanzar en la compatibilización de los usos hidroeléctrico y de riego en la cuenca de río Tinguiririca, se desarrolla un modelo de operación de las centrales, que tiene por objetivo la maximización de ingresos por generación, sujeto a restricciones físicas y a los requerimientos de los usuarios de riego. Una primera aproximación de las preferencias de los usuarios de riego, obtenida en conversaciones con la Junta de Vigilancia de Río Tinguiririca, en caso de existir una operación por bloques, considera:

- Evitar cambios bruscos en el caudal. En cambio, optar por cambios graduales con transiciones de aumentos (o disminución) entre bloques de una duración cercana a dos horas.
- Caudales altos favorables entre los bloques horarios de las 0 y 17 horas.
- En caso de existir caudales bajos, es menos desfavorable que se registren entre los bloques horarios de 18 y 21 horas.

Esta serie de elementos toman como referencia los caudales registrados en la estación fluviométrica Tinguiririca bajo Los Briones, y se traducen en restricciones del problema de optimización de la siguiente manera:

- Límite de rampa de caudal en horas consecutivas en Tinguiririca Bajo Los Briones.
- Para el bloque de 0 a 17 horas, el caudal debe ser superior al 70 % del promedio del caudal horario de cada día.
- Para el bloque de 18 a 21 horas, análogo a lo anterior pero con una cota inferior equivalente al 30 % del caudal promedio.

5.2. Datos de entrada al modelo de optimización

Los datos de entrada para el modelo para la operación de las centrales corresponden a las series de afluentes al sistema, los aportes de caudal entre La Higuera y la estación Tinguiririca bajo Los Briones y los costos marginales de energía del mercado eléctrico. A modo de ejemplo, en las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se presentan las series de caudales de las entradas al modelo, para el mes de enero, correspondiente a los afluentes del sistema.

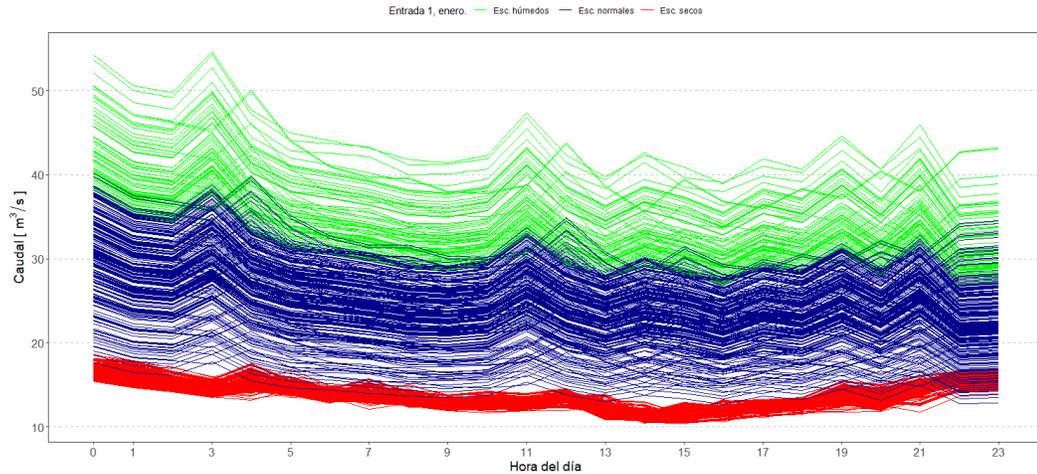


Figura 5.1: Serie de caudales para la entrada 1 (E1) para el mes de enero, simuladas mediante el método de Montecarlo.

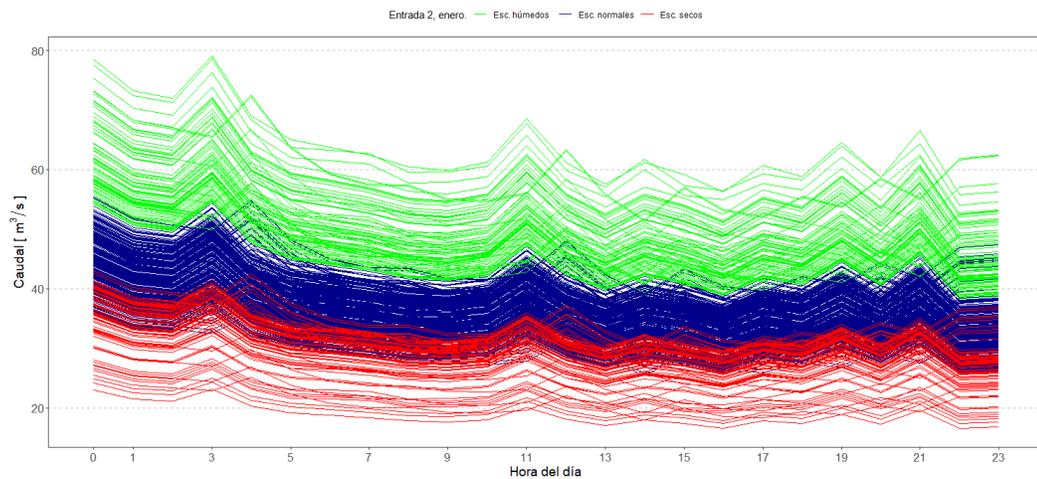


Figura 5.2: Serie de caudales para la entrada 2 (E2) para el mes de enero, simuladas mediante el método de Montecarlo.

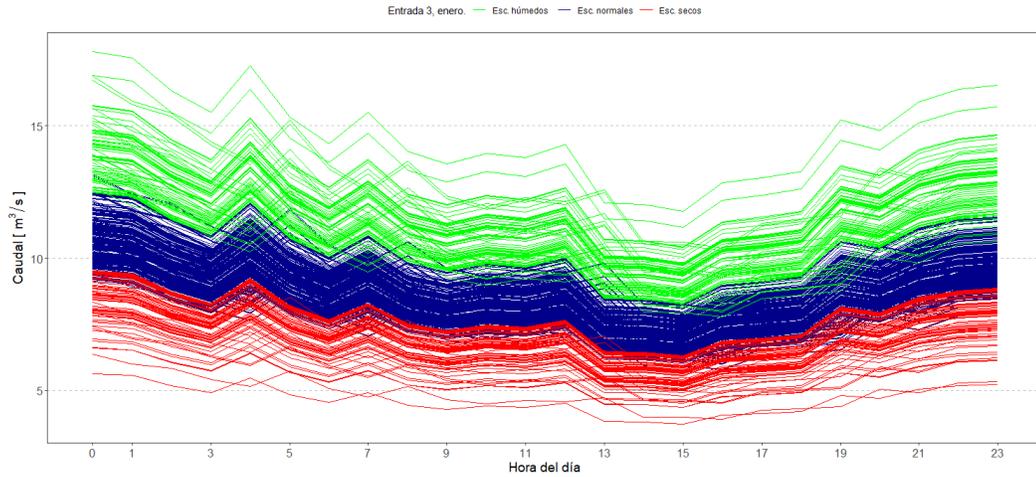


Figura 5.3: Serie de caudales para la entrada 3 (E3) para el mes de enero, simuladas mediante el método de Montecarlo.

La Figura 5.4 señala la proyección de perfiles horarios de costos marginales para cada mes de la temporada de riego para el período 2021-2022, empleada como referencia para el modelo, las que corresponden a simulaciones realizadas por SPEC. El gráfico de la Figura 5.4 indica que las proyecciones de costos marginales toman valores más estables dentro del día entre los meses de febrero y abril, y más fluctuantes el resto del período, alcanzando valores cercanos a cero en las horas cercanas al mediodía. Además, para las distintas curvas se distingue que los valores máximos se hallan entre las 19 y 22 horas.

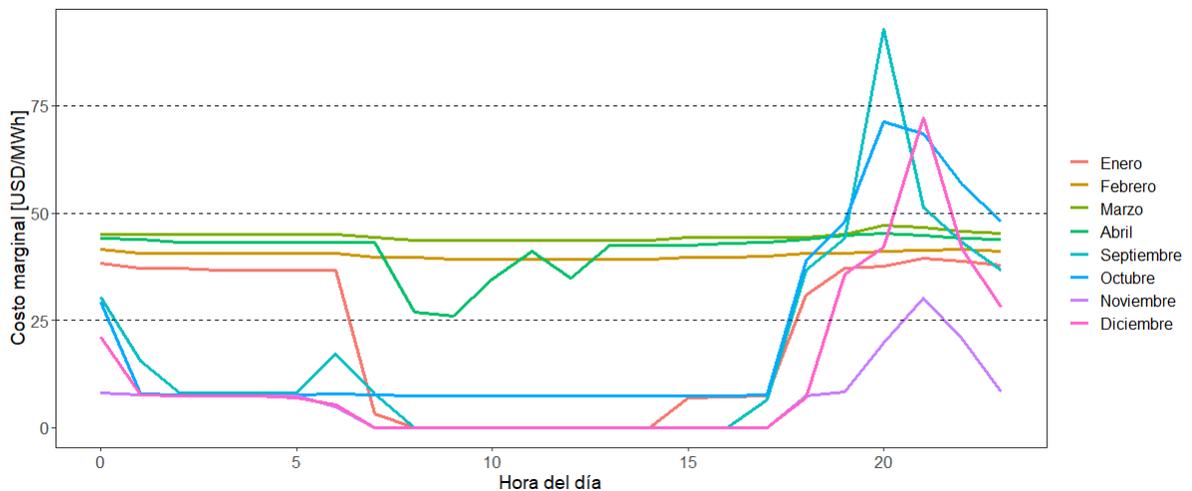


Figura 5.4: Proyecciones del costo marginal, en USD por MWh, empleados como referencia para los meses de riego. Período 2021-2022.

Los caudales afluentes al sistema y los aportes entre La Higuera y la estación fluviométrica se determinan mediante series sintéticas, usando como referencia registros históricos, y por medio de un análisis de frecuencia se establece una distribución de estas variables aleatorias que entregue un ajuste tolerable para un nivel de significancia del 5%. En los anexos A.1,

A.2, A.3 y A.4 se detallan el análisis de frecuencia de las distintas entradas.

5.3. Alteración hidrológica

El diagnóstico de alteración hidrológica en los caudales disponibles para riego en el río Tinguiririca indica que existe alteración hidrológica desde la entrada en operación de las centrales La Confluencia y La Higuera. Con el fin de compatibilizar la generación hidroeléctrica con el uso para riego, en cuanto a continuidad del recurso hídrico, se elabora un modelo de operación de las centrales. El modelo incorpora en sus restricciones las preferencias de los regantes, estableciendo caudales mínimos y límites de rampa de caudal en horas consecutivas.

Como resultado del modelo de operación se obtienen series horarias con un horizonte diario para las variables de estado (volúmenes en los reservorios), los caudales efluentes de cada reservorio, los caudales turbinados por cada central y los caudales en Tinguiririca Bajo Los Briones. Las series generadas, a partir de cada una de las simulaciones de entradas, permiten analizar cómo diferentes restricciones en la operación de las centrales impactan en los registros de la estación fluviométrica aguas abajo y, en consecuencia, al riego. mediante indicadores de alteración hidrológica, comparando estos resultados entre escenarios hídricos.

Los valores empleados para las restricciones de caudal mínimo corresponden a 0, 5, 10 y 15, 20 y 25 m^3/s , mientras que para los límites de rampa horaria se emplean valores de 1 a 6 m^3/s , inclusive, con un espaciamiento de 1 m^3/s . Este total de 36 combinaciones de restricciones se emplea para cada mes del período de riego. A fin de evitar que el problema de optimización sea infactible, por ejemplo, producto de limitaciones en el caudal afluente, se descartan las restricciones que generen esta situación en cada mes.

La Figura 5.5 señala un set de 50 series de caudales a registrarse en Tinguiririca bajo Los Briones como resultado el modelo de operación para el mes de octubre, dado escenarios hídricos hipotéticos normales o húmedos y una serie de costos marginales de generación eléctrica, presentada en el mismo gráfico.

En la Figura 5.5 se indican seis gráficos, asociados a distintas restricciones de rampa de caudal, para un caudal mínimo de 5 m^3/s . De arriba a abajo, los valores límites de rampa de caudal aumentan. Se observa que ante restricciones más relajadas de rampa límite, el modelo tiende a disminuir los caudales turbinados en las horas donde los precios de la energía son casi nulos, en pos de favorecer la generación eléctrica en el bloque punta (desde las 18 horas). Pese a lo anterior, para las distintas restricciones de rampa se observa una tendencia a emular el *peak* de precios en el bloque de 20 horas, que en la figura es posible apreciarlo con un retardo de dos horas aproximadamente.

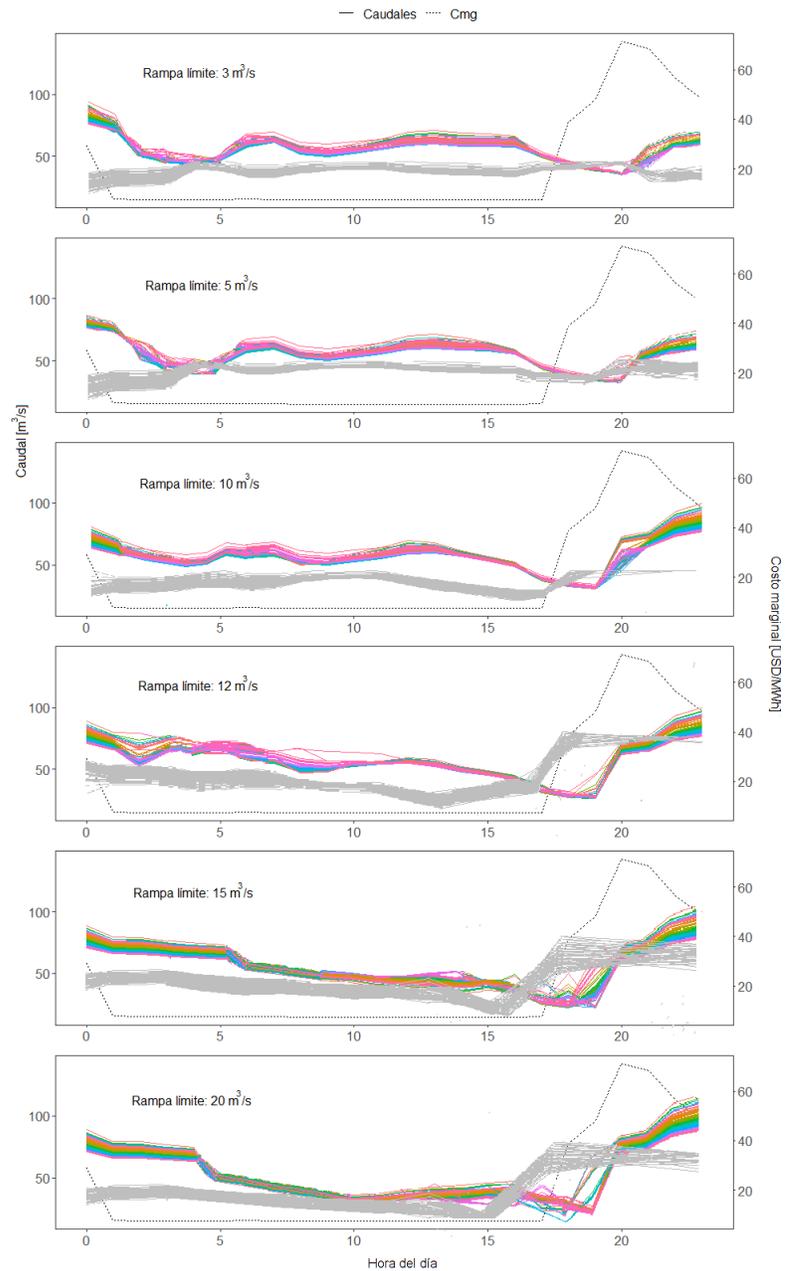


Figura 5.5: Series de caudal en Tinguiririca bajo Los Briones, resultantes del modelo de operación para el mes de octubre, junto a los costos marginales de generación eléctrica de referencia, bajo distintas restricciones de rampa de caudal.

La Figura 5.6 compara los valores medios del índice de Richards-Baker (RBF) intradiario para los caudales resultantes del modelo de operación, para distintas restricciones de caudal mínimo y rampa máxima de caudal.

En términos generales, se aprecia que el RBF varía notoriamente entre mes y mes. Para los meses de mayor caudal, es decir, de noviembre a febrero, el índice de alteración hidrológica toma valores de hasta un orden de magnitud menor, comparado con el resto de los meses

(Figura 5.6). Prácticamente, en todos los períodos estudiados la restricción de caudal mínimo, para el rango empleado, no implicó cambios en la serie de caudales óptima y, en consecuencia, en los valores del RBF. Esto debido a que, para la mayor parte de los escenarios evaluados, estos límites de caudal mínimo son inferiores al valor del caudal pasante, por lo que actúan como restricciones inactivas.

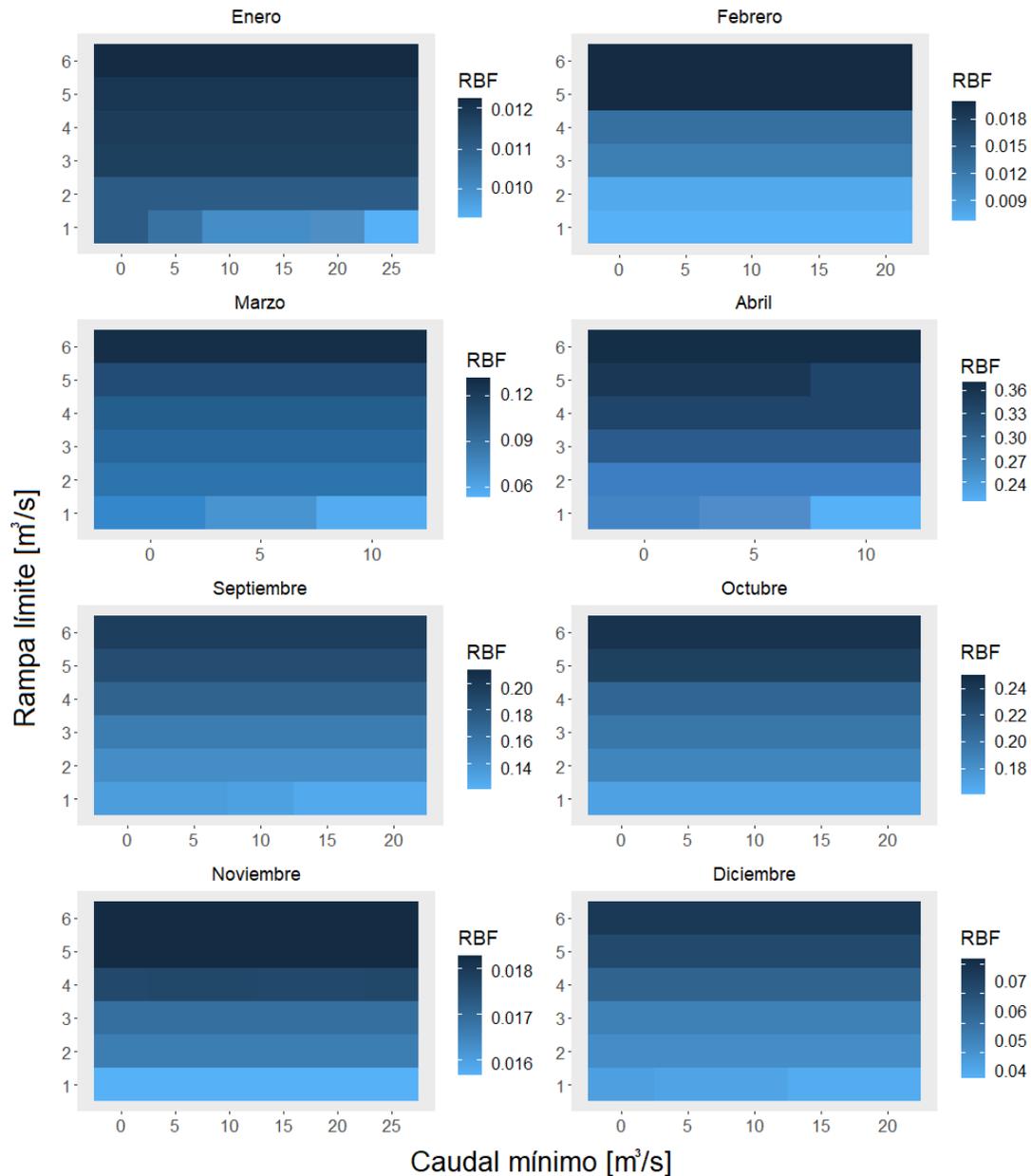


Figura 5.6: Efecto de combinaciones de restricciones de caudal mínimo y rampa máxima sobre el RBF, en Tinguiririca Bajo Los Briones.

Del modo contrario, la restricción de rampa de caudal sí condiciona fuertemente el RBF, con una tendencia de que a mayor rampa límite de caudal, mayor RBF. Esto como consecuencia de caudales con la posibilidad de ser más rampantes y, con ello, estar asociados a una mayor fluctuación del caudal.

A modo de ejemplo, en la Figura 5.7 se indican esquemas de operación resultantes del modelo, para un día seco del mes de enero, según la restricción de rampa máxima de caudal en Tinguiririca Bajo Los Briones. A medida que se relaja esta restricción, los caudales en la estación tienden a emular la forma de la curva de costos marginales (Figura 5.4), con un bloque matutino y otro vespertino de altas, y un bloque valle en torno al mediodía. Con el fin de satisfacer las restricciones de rampa, en horas del día se observa que el caudal turbinado por la central La Higuera comienza a disminuir suavemente, tomando alrededor de seis horas de bajada para la restricción de rampa de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que para la de $6 \text{ m}^3/\text{s}$ esto ocurre en dos horas. Los requerimientos del riego en cuanto a caudales altos favorables y caudales bajos menos desfavorables, se ven reflejados en que el volumen registrado entre las 0 y 17 horas es superior al 70 %, y en el bloque de 18 a 21 horas inferior al 30 %, para los tres casos de restricción de rampa de caudal.

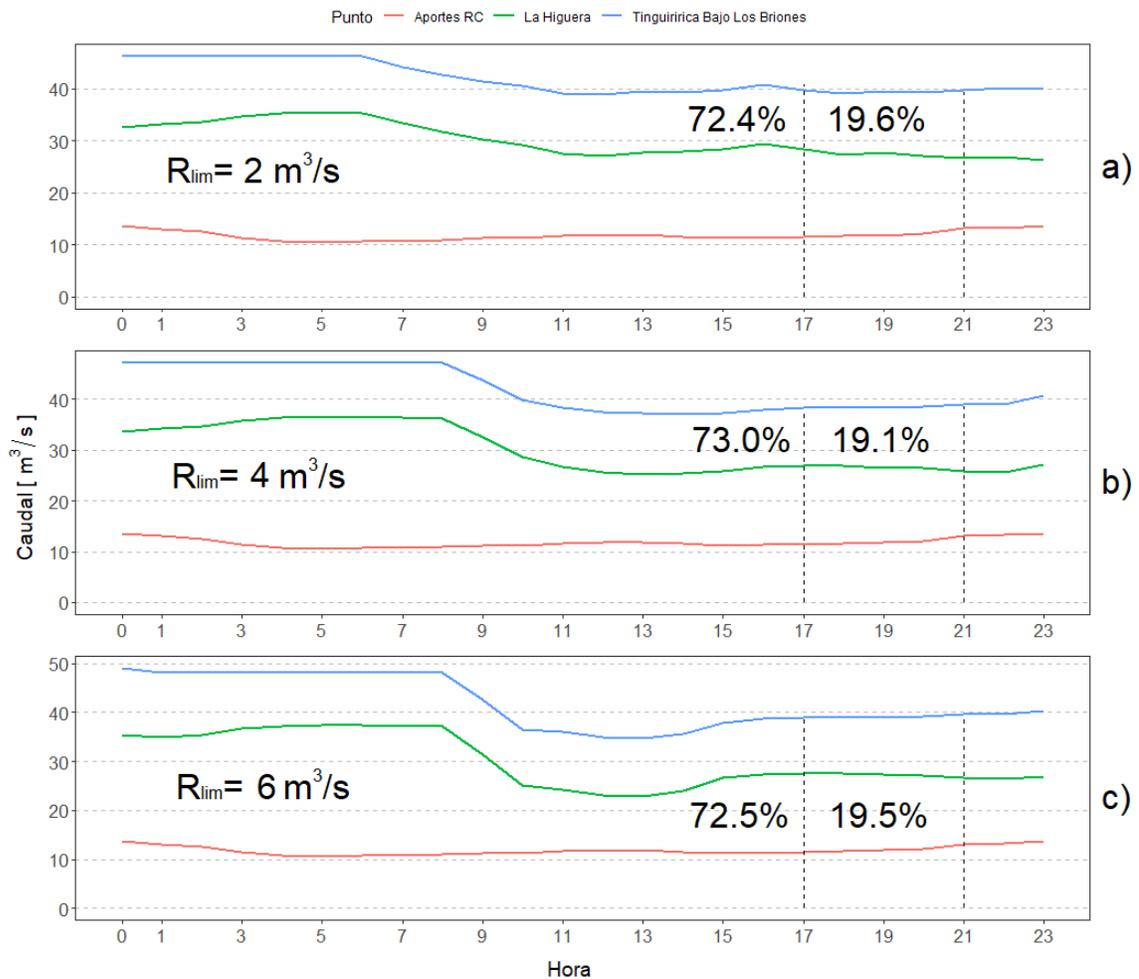


Figura 5.7: Ejemplos de generación obtenido a partir del modelo, para el mes de enero, según restricción de rampa de caudal.

Eventuales mejoras al modelo incluirían ampliar el análisis para caudales mínimos mayores, adaptando la plataforma y la metodología para lidiar con la infactibilidad del problema para algunos escenarios.

5.4. Análisis de esquemas de operación del modelo de optimización

Los esquemas de operación resultantes del modelo de operación incorporan los requerimientos de los usuarios de riego en tres aspectos: limitando las variaciones de caudal en horas consecutivas (rampa límite), los caudales mínimos y fijando horarios de mayor y menor demanda para riego.

Los caudales en Tinguiririca Bajo Los Briones, obtenidos del modelo de operación, dependen en gran medida, pero no exclusivamente, de los caudales turbinados por las centrales. La Figura 5.8 indica el porcentaje promedio que representan los caudales resultantes del modelo en La Higuera, en relación al caudal pasante en Tinguiririca Bajo Los Briones dos horas después, para cada bloque horario. De la figura se desprende que para seis de los ocho meses evaluados (todos, excepto septiembre y octubre), el caudal turbinado por la central La Higuera representa, en promedio, entre el 50 y 80 % del caudal pasante por la estación Tinguiririca Bajo Los Briones en el modelo de operación. Los meses de septiembre y octubre presentan bloques horarios en donde los caudales corresponden a valores cercanos al 10 % de lo que se registra aguas abajo.

Lo enunciado evidencia la importancia que tienen los aportes desde Río Clarillo en el modelo de optimización. A fin de tener esquemas de operación que permitan maximizar los ingresos por generación eléctrica y, además, mantener condiciones en el río de continuidad y fluctuaciones leves que favorezcan a los regantes, es necesario cuantificar de mejor manera el complemento a los caudales turbinados.

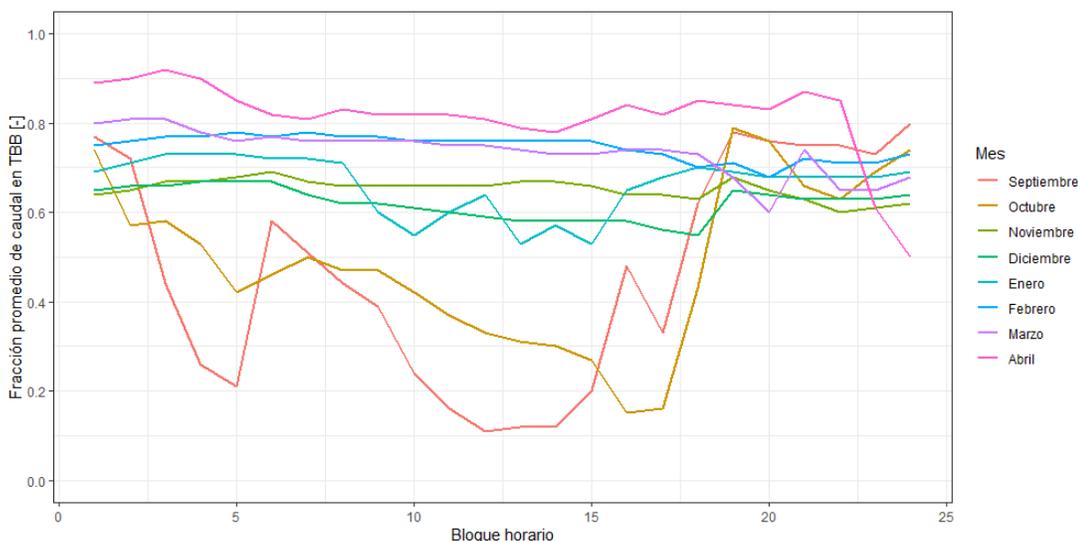


Figura 5.8: Fracción promedio del caudal en Tinguiririca Bajo Los Briones, que representa los caudales en La Higuera, para los resultados del modelo de operación.

Los eventuales beneficios reportados por los usuarios de riego en consecuencia de la regu-

lación de la operación de las centrales se contrastan con el costo para las centrales de dejar de operar en horas donde los costos marginales de generación eléctrica son superiores. Con este fin se evalúan los ingresos totales por la generación eléctrica de ambas centrales, acorde al nivel de restricción empleado en la operación: sin restricciones, restricción leve (caudal mínimo de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ y límite de rampa de $15 \text{ m}^3/\text{s}$) y restricción alta (caudal mínimo de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ y límite de rampa de $5 \text{ m}^3/\text{s}$). A modo de referencia, la Figura 5.9 indica el promedio de los ingresos para las simulaciones en escenarios normales, de donde se destaca que las pérdidas de ingreso varían mes a mes, y son mayores en los que se emplearon esquemas intradiarios de costos marginales muy variables. Para restricciones leves las pérdidas oscilan entre un 1 y un 6 %, mientras que para restricciones estrictas las cifras se ubican entre 2 y 13 %.

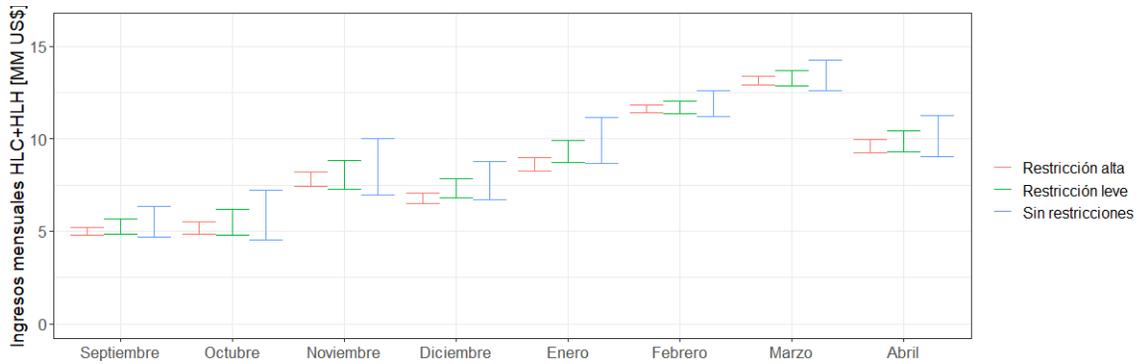


Figura 5.9: Comparación de ingresos por generación eléctrica simulados según nivel de restricción en la operación de centrales.

Capítulo 6

Conclusiones

El análisis de los efectos de la operación de las centrales La Confluencia y La Higuera en el caudal de río Tinguiririca evidencia que gran parte del tiempo se genera en un esquema de *hydropeaking*, asociado a una generación hidroeléctrica en bloques horarios. 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.

La alteración hidrológica en el río Tinguiririca se puede resumir en los siguientes puntos:

- Caudales más fluctuantes dentro del día, con aumentos significativos en todos los indicadores de alteración.
- Caudales mayores en días de la semana donde el precio de la energía es mayor.
- Una disminución en los caudales mínimos y máximos diarios, que no es posible atribuir necesariamente a la operación hidroeléctrica.
- Aumento en la cantidad de pulsos de caudales bajos y medios-bajos. Disminución de pulsos de caudales altos y medios-altos. Disminución de la duración media de pulsos.

El análisis de alteración hidrológica demuestra una potencial interferencia operacional entre las centrales y el riego aguas abajo de las centrales, y por lo tanto sugiere la necesidad de explorar esquemas de operación que permitan compatibilizar de mejor forma ambos usos.

Existe un patrón monótono del índice de Richards-Baker según las restricciones de rampa y caudal mínimo del modelo de operación. Restricciones más severas en rampa conlleva índices de alteración hidrológica menores. Además, el índice resulta más sensible a variaciones en las restricciones de rampa que de caudal mínimo, en todos los períodos evaluados.

Con el fin de hacer del modelo una herramienta de gestión hídrica con aplicabilidad real se requiere determinar los afluentes de las distintas captaciones de las centrales, la instalación de una estación fluviométrica que registre los aportes a río Tinguiririca desde Río Clarillo y avanzar en la determinación de los requerimientos de los usuarios de riego.

Bibliografía

- Alvarez-Garretón, C., Mendoza, P. A., Pablo Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., y Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11):5817–5846.
- Archer, D. y Newson, M. (2002). The use of indices of flow variability in assessing the hydrological and instream habitat impacts of upland afforestation and drainage. *Journal of Hydrology*, 268(1-4):244–258.
- Ashraf, F. B., Haghghi, A. T., Riml, J., Alfredsen, K., Koskela, J. J., Kløve, B., y Marttila, H. (2018). Changes in short term river flow regulation and hydropeaking in Nordic rivers. *Scientific Reports*, 8(1):1–12.
- Baker, D. B., Richards, R. P., Loftus, T. T., y 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.
- Bauer, C. J. (2009). Dams and markets: Rivers and electric power in Chile. *Natural Resources Journal*, 49(3/4):583–651.
- Bejarano, M. D., García-Palacios, J. H., Sordo-Ward, Á., Alonso, C., y Nilsson, C. (2017a). Herramientas para la cuantificación del impacto hidrológico y ecológico de la producción hidroeléctrica. *V Jornadas de Ingeniería del Agua. Entornos fluviales y aguas de transición: impactos de los medio urbanos*.
- Bejarano, M. D., Jansson, R., y Nilsson, C. (2018). The effects of hydropeaking on riverine plants: a review. *Biological Reviews*, 93(1):658–673.
- Bejarano, M. D., Sordo-Ward, Á., Alonso, C., y Nilsson, C. (2017b). Characterizing effects of hydropower plants on sub-daily flow regimes. *Journal of Hydrology*, 550:186–200.
- Bernier, M., Dedieu, J. P., y Duguay, Y. (2016). Snow characterization using radar imaging. En *Land Surface Remote Sensing in Continental Hydrology*, pp. 139–182. Elsevier.
- Bevelhimer, M. S., McManamay, R. A., y O'Connor, B. (2015). Characterizing Sub-Daily Flow Regimes: Implications of Hydrologic Resolution on Ecohydrology Studies. *River Research and Applications*, 31(7):867–879.
- Braun-Cruz, C. C., Tritico, H. M., Beregula, R. L., Girard, P., Zeilhofer, P., Ribeiro, L. d. S., y Fantin-Cruz, I. (2021). Evaluation of Hydrological Alterations at the Sub-Daily Scale Caused by a Small Hydroelectric Facility. *Water*, 13(2):206.
- Bravo, C., Loriaux, T., Rivera, A., y Brock, B. W. (2017). Assessing glacier melt contribution

- to streamflow at universidad glacier, central andes of chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7):3249–3266.
- Carolli, M., Vanzo, D., Siviglia, A., Zolezzi, G., Bruno, M. C., y Alfredsen, K. (2015). A simple procedure for the assessment of hydropeaking flow alterations applied to several european streams. *Aquatic sciences*, 77(4):639–653.
- Chen, Q., Zhang, X., Chen, Y., Li, Q., Qiu, L., y Liu, M. (2015). Downstream effects of a hydropeaking dam on ecohydrological conditions at subdaily to monthly time scales. *Ecological Engineering*, 77:40–50.
- Coordinador Eléctrico Nacional (2020). Instalaciones en Región del Libertad Gral. Bernardo O'Higgins. <https://infotecnica.coordinador.cl/geo/region/ohiggins-8/centrales>.
- Cortés, G. y Margulis, S. (2017). Impacts of El Niño and La Niña on interannual snow accumulation in the Andes: Results from a high-resolution 31 year reanalysis. *Geophysical Research Letters*, 44(13):6859–6867.
- Cushman, R. M. (1985). Review of Ecological Effects of Rapidly Varying Flows Downstream from Hydroelectric Facilities. *North American Journal of Fisheries Management*, 5(3A):330–339.
- Dourojeanni A., Jouravlev A., y C. G. (2002). *Gestión del Agua a Nivel de Cuencas*, volumen 47. CEPAL.
- Golubev, G. N. (1988). Sustainable management of water resources: A basinwide approach. *International Journal of Water Resources Development*, 4(4):219–223.
- Greimel, F., Schülting, L., Graf, W., Bondar-Kunze, E., Auer, S., Zeiringer, B., y Hauer, C. (2018). Hydropeaking Impacts and Mitigation. *Riverine Ecosystem Management*, pp. 91–110.
- Haas, J., Olivares, M. A., y Palma-Behnke, R. (2015). Grid-wide subdaily hydrologic alteration under massive wind power penetration in Chile. *Journal of Environmental Management*, 154:183–189.
- Hall Jr, R. O., Yackulic, C. B., Kennedy, T. A., Yard, M. D., Rosi-Marshall, E. J., Voichick, N., y Behn, K. E. (2015). Turbidity, light, temperature, and hydropeaking control primary productivity in the Colorado river, Grand Canyon. *Limnology and Oceanography*, 60(2):512–526.
- Jager, H. I. y Bevelhimer, M. S. (2007). How run-of-river operation affects hydropower generation and value. *Environmental Management*, 40(6):1004–1015.
- Loucks, D. P. y van Beek, E. (2017). *Water Resources Planning and Management: An Overview*, pp. 1–49. Springer International Publishing, Cham.
- Lundquist, J. D. y 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.
- McKinney, T., Speas, D. W., Rogers, R. S., y 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.
- Meile, T., Boillat, J.-L., y Schleiss, A. J. (2011). Hydropeaking indicators for characterization

- of the Upper-Rhone River in Switzerland. *Aquatic Sciences*, 73(1):171–182.
- Meinzen-Dick, R. y Jackson, L. A. (1996). Multiple uses, multiple users of water resources. En *6th Conference of the International Association for the Study of Common Property*. Berkeley, California, pp. 6–10.
- Nagrodski, A., Raby, G. D., Hasler, C. T., Taylor, M. K., y Cooke, S. J. (2012). Fish stranding in freshwater systems: Sources, consequences, and mitigation. *Journal of Environmental Management*, 103:133–141.
- Paravan, D., Stokelj, T., y Golob, R. (2004). Improvements to the water management of a run-of-river HPP reservoir: Methodology and case study. *Control Engineering Practice*, 12(4):377–385.
- Pitana, I. G. (1993). Performance indicators: A case of a newly developed finis in bali, indonesia. En *Performance Measurement in Farmer-managed Irrigation Systems: International Workshop: Papers and Abstracts*, p. 13. IWMI.
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., y Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47(11):769–784.
- Rheinheimer, D. E. y Viers, J. H. (2015). Combined Effects of Reservoir Operations and Climate Warming on the Flow Regime of Hydropower Bypass Reaches of California’s Sierra Nevada. *River Research and Applications*, 31(3):269–279.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., y Braun, D. P. (1996). A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4):1163–1174.
- Torabi Haghghi, A. y Kløve, B. (2013). Development of a general river regime index (RRI) for intra-annual flow variation based on the unit river concept and flow variation end-points. *Journal of Hydrology*, 503:169–177.
- Unfer, G., Hauer, C., y Lautsch, E. (2011). The influence of hydrology on the recruitment of brown trout in an Alpine river, the Ybbs River, Austria. *Ecology of Freshwater Fish*, 20(3):438–448.
- Valentin, S., Wasson, J. G., y Philippe, M. (1995). Effects of hydropower peaking on epilithon and invertebrate community trophic structure. *Regulated Rivers: Research & Management*, 10(2-4):105–119.
- Vanzo, D., Zolezzi, G., y Siviglia, A. (2016). Eco-hydraulic modelling of the interactions between hydropeaking and river morphology. *Ecohydrology*, 9(3):421–437.
- Zimmerman, J. K., Letcher, B. H., Nislow, K. H., Lutz, K. A., y Magilligan, F. J. (2010). Determining the effects of dams on subdaily variation in river flows at a whole-basin scale. *River Research and Applications*, 26(10):1246–1260.

Anexo A

Resultados

A.1. Frecuencia y duración de pulsos de caudal

Tabla A.1: Frecuencia de pulsos anuales para los umbrales 1M, 3M, 5M y el 90 % del caudal de diseño de la central La Higuera.

Umbral	2000	01'	02'	03'	04'	05'	06'	07'	08'	10'	11'	12'	13'	14'	15'	16'	17'	18'	19'
1M	40	38	25	44	85	26	44	26	37	160	182	143	119	172	106	207	185	143	155
90% Q_d LH	32	81	46	55	36	105	64	82	110	145	148	58	64	73	83	95	77	109	40
3M	14	69	98	25	60	41	140	10	52	30	0	6	1	6	57	29	56	5	0
5M	7	19	57	29	4	20	34	14	27	0	0	5	0	0	2	2	1	1	0

Tabla A.2: Duración media anual de pulsos, en horas, para los umbrales 1M, 3M, 5M y el 90 % del caudal de diseño de la central La Higuera.

Umbral	2000	01'	02'	03'	04'	05'	06'	07'	08'	10'	11'	12'	13'	14'	15'	16'	17'	18'	19'
1M	61	101	71	97	60	53	82	266	75	171	13	49	13	22	41	52	22	31	33
90% Q_d LH	59	81	173	169	109	54	88	81	57	24	12	26	33	33	29	65	33	31	22
3M	77	8	22	24	6	6	4	15	6	10	4	20	14	6	9	18	3	4	10
5M	5	2	20	6	3	12	8	14	4	0	0	12	0	0	5	46	0	2	0

Tabla A.3: Comparación de la media de pulsos anual para distintos umbrales de caudal entre los períodos 2000-10 y 2011-19.

Período	0.1M	0.3M	0.5M	1M	2M	3M	4M	5M	6M	7M	8M	9M	10M
2001-10	0,1	5,1	27,1	52,5	77,4	53,9	55,2	21,1	11,0	9,5	6,9	5,1	3,8
2011-20	18,0	137,1	192,6	156,9	68,2	17,8	5,7	1,2	1,1	0,8	0,7	0,9	0,6

A.2. Análisis de frecuencia para los afluentes al sistema

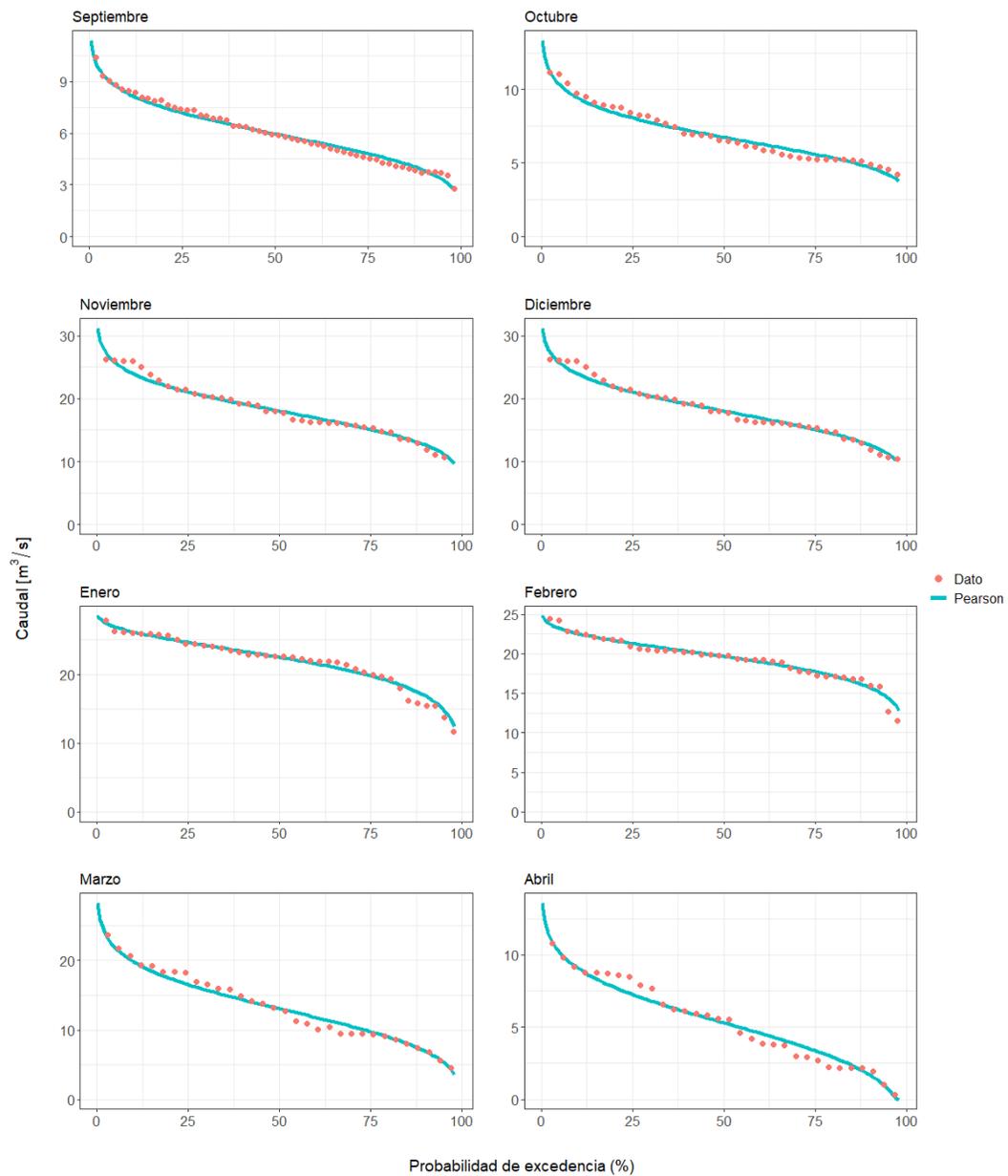


Figura A.1: Resultados del análisis de frecuencia a los caudales medios diarios de los afluentes al reservorio Tinguiririca (E1), según mes de la temporada de riego.

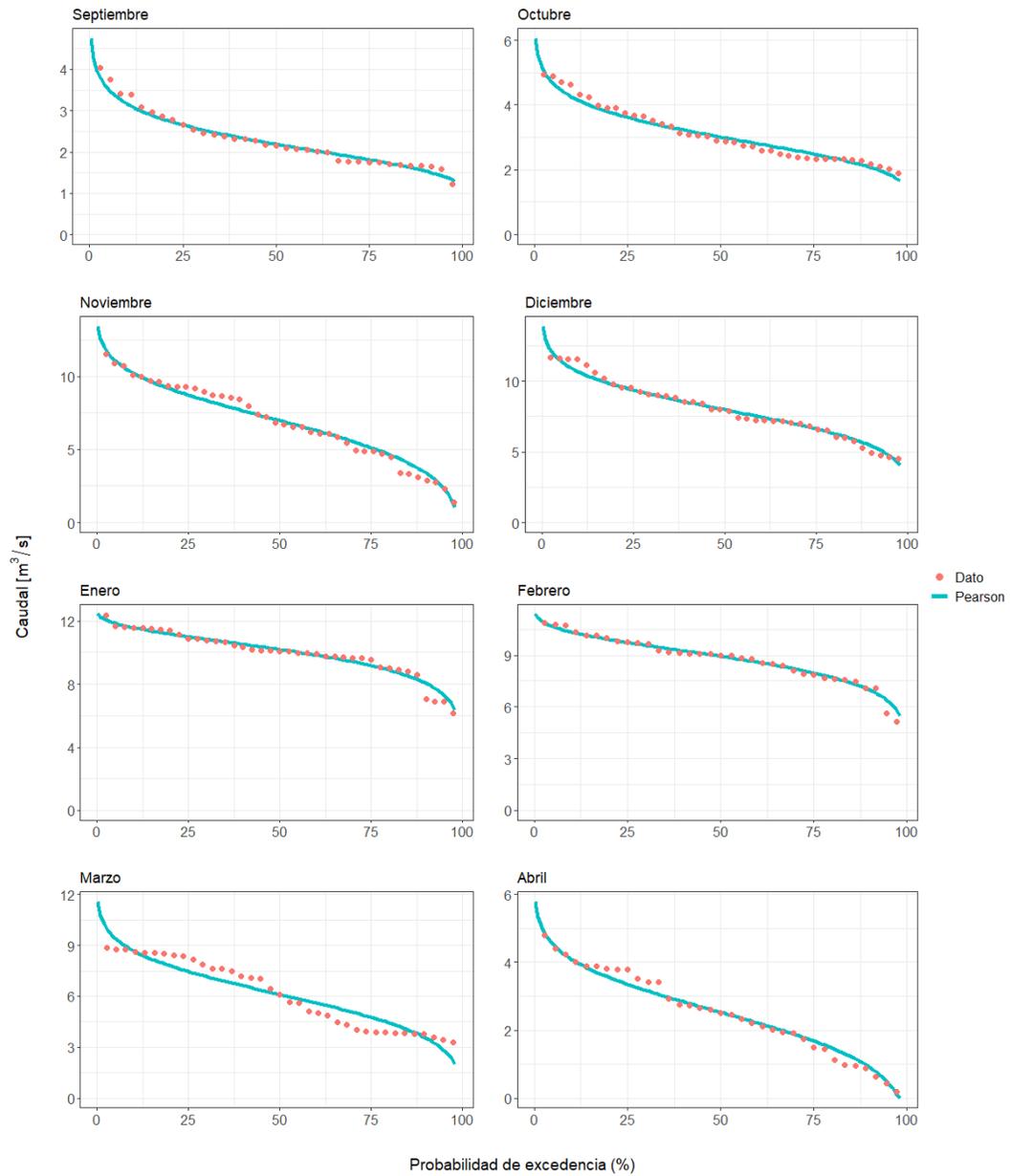


Figura A.2: Resultados del análisis de frecuencia a los caudales medios diarios de los afluentes a la central La Confluencia que no son regulados por el reservorio Tinguiririca (E2), según mes de la temporada de riego.

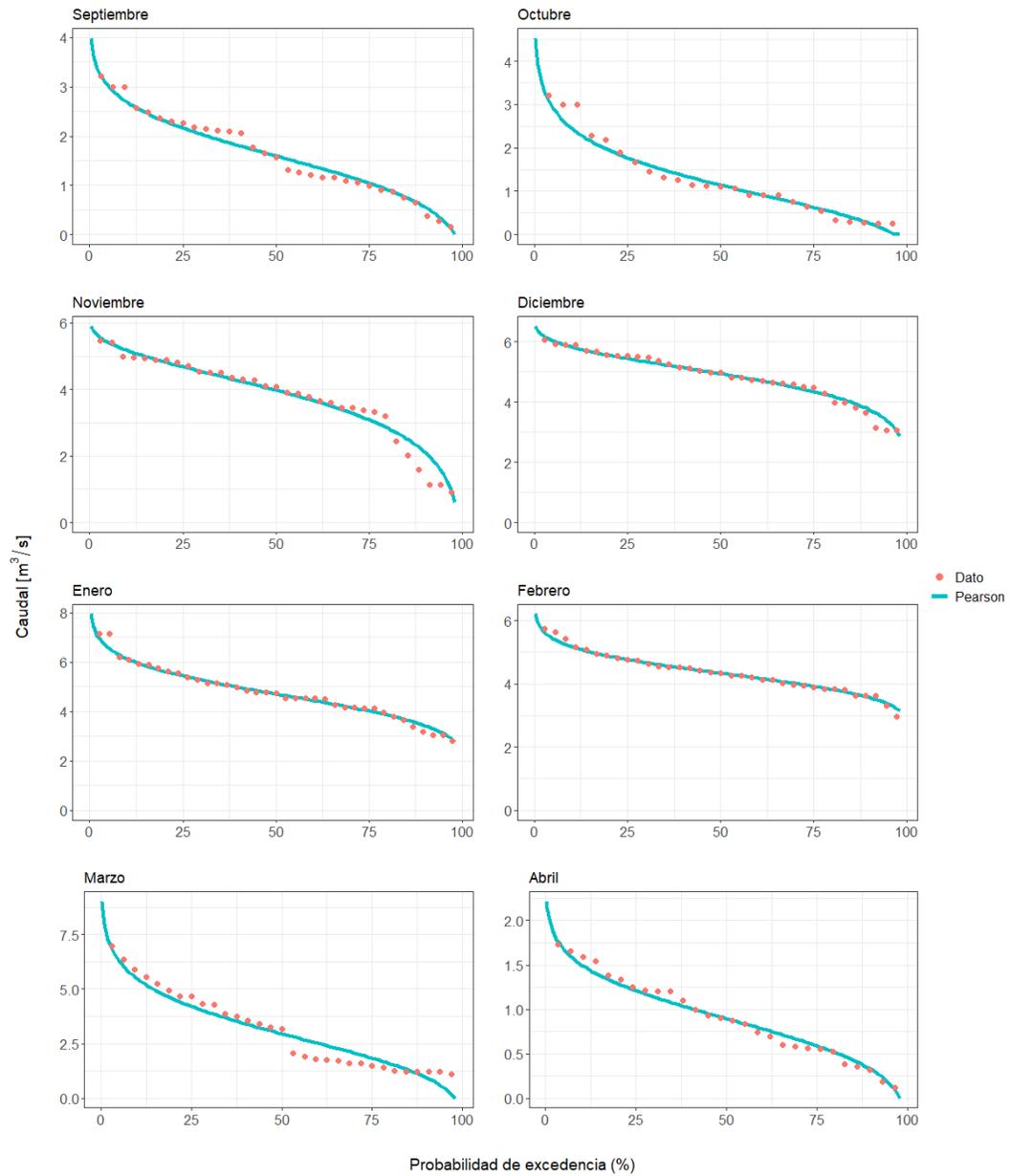


Figura A.3: Resultados del análisis de frecuencia para los caudales medios diarios de los afluentes al reservorio Tricahue (E3), según mes de la temporada de riego.

Tabla A.4: Prueba χ^2 para la distribución Pearson, con un nivel de significación de 0,05 para los caudales medios diarios de los afluentes al reservorio Tinguiririca (E1).

Mes	$\chi^2(0,05)$	$\chi^2(\text{calculado})$
Septiembre	12,592	10,582
Octubre	12,592	10,876
Noviembre	12,592	1,528
Diciembre	12,592	9,901
Enero	12,592	12,165
Febrero	12,592	9,865
Marzo	12,592	7,888
Abril	12,592	12,087

Tabla A.5: Prueba χ^2 para la distribución Pearson, con un nivel de significación de 0,05 para los caudales medios diarios de los afluentes a la central La Confluencia que no son regulados por el reservorio Tinguiririca (E2).

Mes	$\chi^2(0,05)$	$\chi^2(\text{calculado})$
Septiembre	12,592	8,844
Octubre	12,592	8,324
Noviembre	12,592	8,609
Diciembre	12,592	4,286
Enero	12,592	11,001
Febrero	12,592	7,042
Marzo	12,592	10,858
Abril	12,592	9,206

Tabla A.6: Prueba χ^2 para la distribución Pearson, con un nivel de significación de 0,05 para los caudales medios diarios de los afluentes al reservorio Tricahue (E3), según mes de la temporada de riego.

Mes	$\chi^2(0,05)$	$\chi^2(\text{calculado})$
Septiembre	12,592	9,659
Octubre	18,307	6,946
Noviembre	15,507	12,131
Diciembre	15,507	8,937
Enero	15,507	1,742
Febrero	16,919	5,227
Marzo	12,592	8,396
Abril	12,592	3,796

A.3. Análisis de frecuencia para aportes entre La Higuera y est. Tinguiririca bajo Los Briones

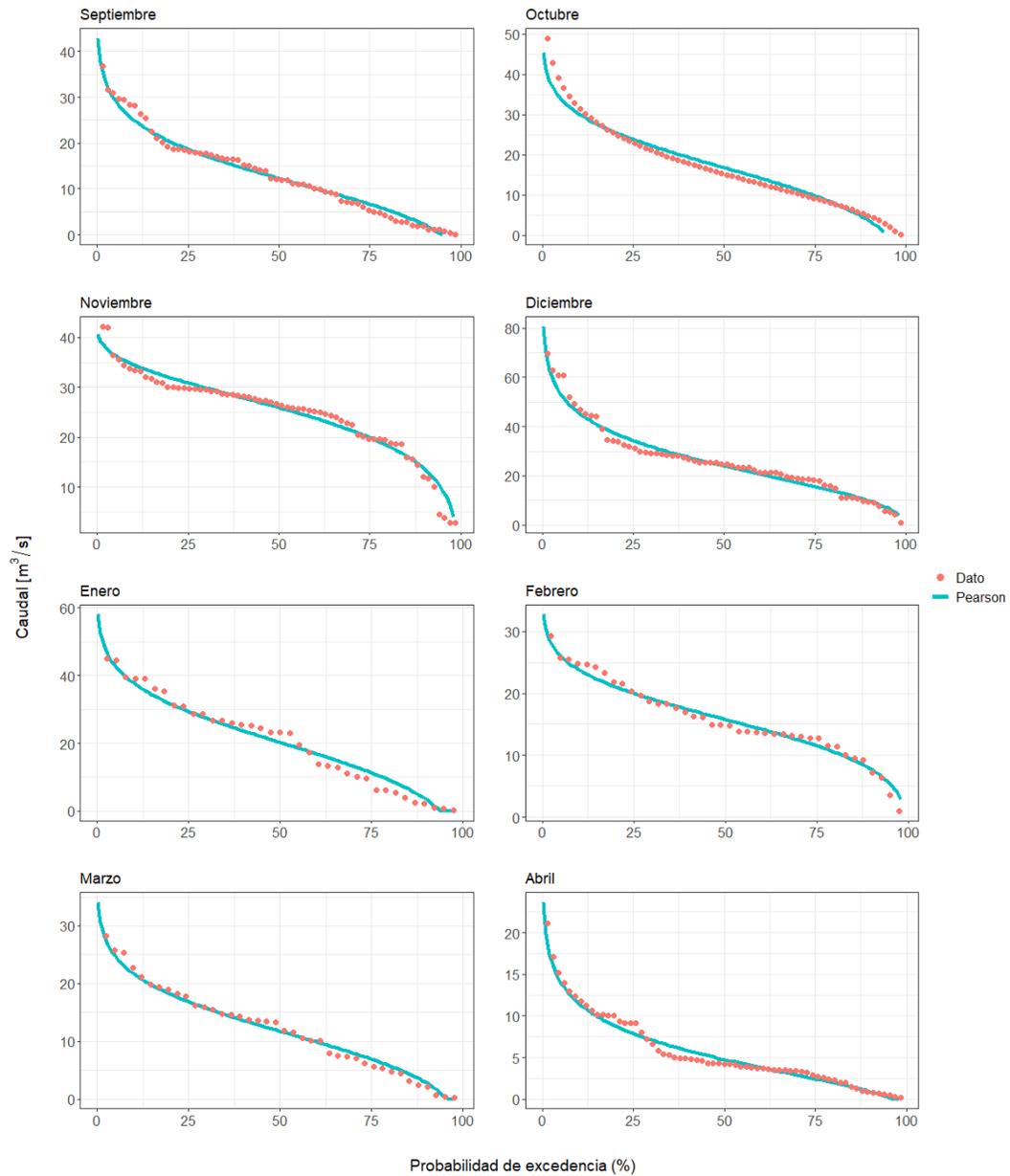


Figura A.4: Resultados del análisis de frecuencia para los aportes entre los caudales registrados en Tinguiririca bajo Los Briones y la central La Higuera

Tabla A.7: Prueba χ^2 para la distribución Pearson, con un nivel de significación de 0,05 para los aportes entre la central La Higuera y Tinguiririca bajo Los Briones.

Mes	$\chi^2(0,05)$	$\chi^2(\text{calculado})$
Septiembre	5,991	2,874
Octubre	5,991	3,860
Noviembre	12,592	12,237
Diciembre	12,592	7,631
Enero	12,592	10,627
Febrero	12,592	12,511
Marzo	12,592	2,452
Abril	12,592	10,893