

**FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE LA OPERACIÓN SOSTENIBLE DE LA  
REPRESA HIDROELÉCTRICA PANGUE, HACIA UNA GESTIÓN INTEGRADA  
DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO BIOBÍO, CHILE**

**ECONOMIC FEASIBILITY OF THE SUSTAINABLE OPERATION OF THE  
PANGUE HYDROELECTRIC DAM, TOWARDS INTEGRATED WATER  
MANAGEMENT IN THE BIOBIO RIVER BASIN, CHILE**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA  
Y  
GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:**

**JUAN ENRIQUE VALLEJOS CARLE**

**Dirigido por:**

**Dr. ALBERTO DEL VILLAR GARCIA**

**Alcalá de Henares, a 30 de enero de 2021**

## **AGRADECIMIENTO**

Al Directorio de la Asociación de Canalistas Biobío Negrete por concederme el tiempo y financiamiento para desarrollar este máster.

A Claudio Meier de The University of Memphis; Alejandra Stehr del centro EULA de la Universidad de Concepción; Claudio Rojas, Rodrigo Romero y Víctor Cuevas de las Organizaciones de Usuarios de Agua del Biobío; Rafael Pérez y Christian Aedo, de la Dirección General de Aguas; Rodrigo Fuster de Universidad de Chile; Nicolás Sánchez de Energías Llaima y Jorge Vergara de Fundación Diálogos para la Naturaleza, por aportar información base del presente trabajo.

## **ACKNOWLEDGMENT**

To the Board of Directors of the Association of Canalistas Biobío Negrete for granting me the time and financing to develop this master.

To Claudio Meier from The University of Memphis; Alejandra Stehr from the EULA center of the Universidad de Concepción; Claudio Rojas, Rodrigo Romero y Víctor Cuevas from Biobío Irrigation Organization; Rafael Pérez and Christian Aedo, from the General Water Directorate; Rodrigo Fuster, from Universidad de Chile; Nicolás Sanchez from Energías Llaima and Jorge Vergara from Diálogos para la naturaleza Foundation; for providing basic information for this work.

## INDICE

RESUMEN .....	4
I. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES .....	5
II. OBJETIVOS .....	10
III. METODOLOGÍA .....	11
IV. MATERIALES Y DESCRIPCIÓN .....	15
V. RESULTADOS .....	38
VI. CONCLUSIONES .....	43
VII. BIBLIOGRAFÍA .....	45

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Caudal medio mensual, caudal máximo promedio y caudal mínimo promedio para el año 2019 .....	23
<b>Tabla 2.</b> Caudales mínimos y máximos absolutos ocurridos en horario de punta y horario de valle durante el año 2019 .....	23
<b>Tabla 3.</b> Tasas máximas de ascenso y descenso de caudal, para cada mes del año 2019 .....	24
<b>Tabla 4.</b> Caudal, duración y tasa de variación, para la estación Rucalhue del río Biobío, año 2019 .....	29
<b>Tabla 5.</b> Costes adicionales generados a las OUA por vigilancia y deterioro acelerado en los canales de riego (€) .....	38
<b>Tabla 6.</b> Costes calculados para agricultores, asociados a las pérdidas de eficiencia de riego (€) .....	38
<b>Tabla 7.</b> Costes asociados a las pérdidas de superficie regada destinada a secano para cada organización de usuarios (€) .....	39
<b>Tabla 8.</b> Planilla de cálculo CAE para el escenario propuesto.....	42

## LISTADO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

AC	:	Asociación de Canalistas (Chile)
ACB	:	Análisis Coste Beneficio
CEN	:	Coordinador Eléctrico Nacional
DGA	:	Dirección General de Aguas
ERNC	:	Energías renovables no convencionales
GIRH	:	Gestión Integrada de Recursos Hídricos
GWP	:	Global Water Partnership
IPC	:	índice de Precios al Consumidor (Chile)
INBO	:	International Network of Basin Organizations
OECD	:	Organisation for Economic Cooperation and Development
OUA	:	Organizaciones de Usuarios de Agua (Chile).
UNEP	:	United Nation Environment Programme
WRI	:	World Resources Institute

## **RESUMEN**

El sistema eléctrico chileno, diseñado para suplir una demanda variable, cuenta en la actualidad con una serie de centrales hidroeléctricas que, por su versatilidad, permiten entregar potencia en un corto tiempo. Esta condición, para el caso de las centrales ubicadas en los ríos, supone violentas descargas de agua durante lapsos cortos, variables e impredecibles. Estas variaciones bruscas en el caudal del río, conocida como hydropeaking, producen serias afectaciones a otros usuarios de la cuenca como agricultores y pescadores, pero muy especialmente, al ecosistema fluvial.

Con el objeto de contribuir al uso sostenible mediante la gestión integrada del agua en la cuenca del Biobío, se plantean algunas reglas a la operación del embalse Pangué, ubicado sobre el río Biobío en la zona central de Chile, que permita una mejor utilización del agua por parte de los usuarios agrícolas de la cuenca, aporte a la sostenibilidad del ecosistema fluvial y no afecte en forma significativa los resultados económicos de la empresa generadora. De esta manera, se pretende evitar conflictos y usar el agua con una mirada multisectorial, apuntando a enfrentar de mejor manera los escenarios de escases hídrica previstos por los modelos de cambio climático para Chile.

## **SUMMARY**

The Chilean electrical system, designed to meet variable demand, currently has a number of hydroelectric plants that, because of its versatility, allow power to be delivered in a short time. This condition, for plants located in rivers, involves violent discharges of water for short, variable and unpredictable lapses. These abrupt variations in river flow, known as hydropeaking, cause serious impacts on other users of the basin such as farmers and fishermen, but especially the river ecosystem.

In order to contribute to sustainable use through integrated water management in the Biobío basin, some rules are proposed to the operation of the Pangué reservoir, located on the Biobío River in central Chile, which allows better use of water by agricultural users of the basin, contributes to the sustainability of the river ecosystem and does not significantly affect the economic performance of the generating company. In this way, it is intended to avoid conflict and use water with a multisectoral look, aiming to better address the water shortage scenarios provided by climate change models for Chile.

## I. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Los especialistas reconocen, desde hace mucho, que la unidad básica para la gestión del agua es la cuenca hidrográfica, como también, la gravitante importancia que tiene gestionar adecuadamente el agua para asegurar la sostenibilidad del ecosistema y, en consecuencia, para la población. En tal sentido, la Cumbre Mundial 2002 sobre el desarrollo sostenible hizo un llamado a todos los países para que desarrollaran Planes de Gestión Integrada de Recursos Hídricos y Eficiencia Energética, ante lo cual, muchos países han debido adecuar su legislación, su estructura organizacional y sus presupuestos, para asumir este sistema de planificación que considera la cuenca hidrográfica como área de gestión.

La gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) a nivel de cuencas hidrográficas puede ser definida como “un proceso de gestión coordinada del agua, la tierra y los recursos asociados dentro de los límites de una cuenca para optimizar y compartir equitativamente el resultante bienestar socioeconómico sin comprometer la salud de los ecosistemas vitales a largo plazo” (GWP, 2009). La GIRH es ampliamente usada para el combate de crecidas y sequías, para preservar los ecosistemas acuáticos o para racionalizar otras relaciones entre aguas arriba y aguas abajo (UNEP, 2014). Estos aspectos resultan especialmente relevantes, para la gestión de los recursos hídricos, cuando existen embalses artificiales que regulan los caudales de los ríos y modifican el régimen natural de los flujos, ya que, los objetivos de la planificación territorial y de la gestión integrada de los recursos hídricos, se tornan muy dificultosos de cumplir cuando la operación de los embalses no se realiza con propósitos comunes a todos los usuarios de la cuenca.

Es claro que la construcción privada de embalses exige una explotación rentable a sus inversores, por lo que, de no mediar una intervención estatal, la gestión de las aguas embalsadas se enfoca, casi exclusivamente, a obtener la mayor eficiencia económica del sector que realiza la inversión. Esta mirada monosectorial en la explotación de grandes embalses ha variado, en el mundo, hacia una mirada multisectorial que permita un uso racional del agua para distintos sectores, entre los que se considera, además de los sectores productivos, especialmente importante la conservación del medio ambiente. Según la OCDE, en Sudamérica sólo un 25% de las presas y embalses son gestionados en multipropósito, cifra que

sólo se sitúa bajo el 30% que ostenta Norteamérica, por lo que elevar esta cifra es hoy un desafío mundial.

La energía hidroeléctrica está siendo fomentada a nivel mundial por ser renovable y limpia. Sin embargo, su producción conlleva impactos al ecosistema fluvial, destacando las consecuencias ecológicas de la alteración de los regímenes naturales de caudales. Concretamente, las centrales a pie de presa operan de forma intermitente de acuerdo con los precios y la demanda de energía, que varían de forma instantánea, provocando el fenómeno de hydropeaking, el que consiste en la variación frecuente y rápida del caudal en un breve periodo de tiempo, generalmente a lo largo del día y que resulta en alteraciones de parámetros hidráulicos como el nivel del agua, la velocidad del flujo, la tensión de arrastre, de la morfología fluvial y de la calidad del agua. (Bejarano et al, 2017)

Por otra parte, si la central hidroeléctrica es de embalse y este se estratifica en la temporada cálida, entonces pueden sumarse fluctuaciones muy definidas de temperatura (conocidas como thermopeaking) a los pulsos de caudal, componiendo los impactos. El hydro y el thermopeaking causan una serie de impactos sobre la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas fluviales. Además, es sabido en el caso chileno que, los pulsos de caudal causados por la generación de punta son un problema para los sistemas de riego ya que muchos de estos no cuentan con bocatomas automatizadas que puedan ajustarse a medida que fluctúa el río, de modo de seguir aduciendo el mismo caudal. (Meier et al, 2015)

Chile, en la actualidad, no gestiona los recursos hídricos en forma integrada y no cuenta con organismos de cuenca con atribuciones que permitan desarrollar planes para la GIRH en las cuencas, por lo que la explotación y gestión de los recursos hídricos se realiza en forma independiente desde cada sector. Este modelo de gestión ha subsistido, durante décadas, básicamente por la abundancia de recursos hídricos disponibles, en la mayoría de las cuencas del país, con lo que se han podido satisfacer de buena forma la mayor parte de las demandas de agua. Sin embargo, el crecimiento poblacional y económico del país, sumado a escenarios de cambio climático tendientes a disminuir la oferta de recursos hídricos, ha generado un estrés hídrico en muchas cuencas del país y ocasiona serios conflictos

entre los distintos sectores productivos. A esta tensa relación se ha sumado el medioambiente, con la creciente necesidad de preservar los recursos naturales y los paisajes relacionados al agua, hasta ahora ignorados.

La cuenca del río Biobío, está comprendida entre los paralelos 36°42' – 38°49' Latitud Sur y los meridianos 71° - 73°20' Longitud Oeste. Con 24.264 km<sup>2</sup> y un caudal medio anual de 900 m<sup>3</sup>/s es la tercera mayor cuenca del país, se ubica en la zona centro sur de Chile y sus principales cauces se encuentran regulados, ya sea por el control sobre aguas de lagos naturales o con embalses artificiales ubicados en la parte alta de los ríos. Su cauce principal es el río Biobío, el que se desarrolla por 380 km desde la laguna Galletue, en la cordillera de Los Andes a 1.160 m.s.n.m., hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, en las proximidades de la ciudad de Concepción. El río Biobío, posee tres embalses de generación hidroeléctrica, siendo el mayor de ellos el embalse originado por la represa de la central hidroeléctrica Ralco, con una capacidad de 1222 hm<sup>3</sup> y una potencia instalada de 690 MW, aguas abajo de este se ubica el embalse originado por la central hidroeléctrica Pangue, que posee una potencia de 456 MW y genera una energía media anual de 2.156 GWh; fue construido en el año 1996 y forma un embalse de 500 ha, con un largo de 14 km y un ancho promedio de 360 m que le brinda una capacidad de acumulación de unos 175 hm<sup>3</sup>. Finalmente, se ubica aguas abajo de Pangue, un pequeño embalse originado por la central hidroeléctrica Angostura que tiene una potencia instalada de 323 MW. A lo largo de su recorrido, las aguas del río Biobío son utilizadas, entre otros usos, para generación hidroeléctrica, riego, industria, agua potable, pesca deportiva, turismo y recreación, junto con ser fuente para la vida de muchas especies endémicas.

Las centrales hidroeléctricas, ubicadas en la alta cordillera, poseen un sistema de operación en horas punta, donde la mayor parte de la generación diaria se realiza para suplir los picos de consumo de la población, coincidiendo estos con los valores de energía más altos durante del día. Esta operación, supone la descarga violenta de caudales durante las horas punta de generación (500 m<sup>3</sup>/s) y la disminución significativa de los caudales durante las horas de bajo consumo (30 m<sup>3</sup>/s). Tales fluctuaciones de caudal, realizadas en forma violenta e impredecible, generan el fenómeno que se conoce como hydropeaking, el que resulta en serias afectaciones



al ecosistema fluvial y causa importantes problemas en la operación de los canales de riego que tienen sus captaciones aguas abajo de la presa, entre otros problemas. Tal situación, ha obligado a la generadora a compensar una parte de los mayores costes en la operación de los sistemas de riego, que esta situación impone a las organizaciones de regantes, sin embargo, la instalación de minicentrales hidroeléctricas en las redes de abastecimiento de riego y la mayor exigencia de los usuarios por contar con un servicio constante, está acrecentando el problema del uso oportuno del agua destinada a la agricultura. En tanto, el medio ambiente, como un actor invisible, no tiene a la fecha ningún plan de remediación de los impactos causados por hydropeaking.

Existe abundante investigación científica que apunta a la necesidad de corregir los efectos del hydropeaking en beneficio de la conservación del ecosistema fluvial. Adicionalmente, existe evidencia que el hydropeaking ha elevado los costes de la administración de canales de riego. En consecuencia, parece razonable plantearse un modelo de generación hidroeléctrica en la cuenca del Biobío que disminuya los efectos del hydropeaking y evite problemas mayores en el futuro, debido al esperable aumento de la conflictividad asociada al uso del agua, especialmente si consideramos que (según el informe de WRI, 2015) Chile está dentro de los 30 Estados del mundo con mayor estrés hídrico, donde se destaca como la única nación latinoamericana que pasará a un estrés hídrico extremadamente alto al año 2040 y es una de las naciones con mayor probabilidad de enfrentar una disminución en el suministro de agua, debido a los efectos combinados del alza de las temperaturas en regiones críticas y los cambios en los patrones de precipitación.

En la actualidad, se discute en el congreso, un proyecto de ley sobre certeza hídrica que busca regular la generación hidroeléctrica, dando preferencia al consumo y a la agricultura, por lo que resulta especialmente desafiante, que el modelo de generación a plantear se proyecte considerando la relevancia que tiene el derecho de propiedad sobre las aguas en Chile y el derecho que posee la empresa hidroeléctrica de rentabilizar adecuadamente su inversión, por lo que no basta con proponer un modelo de funcionamiento ideal, impuesto por autoridad, sino más bien un modelo mejorado de operación del embalse que ponga especial énfasis en su factibilidad técnica- económica de manera que permita la implementación voluntaria

por parte de los actores involucrados.

El presente estudio ha considerado como foco de intervención a la central hidroeléctrica Pangué debido a algunas características estratégicas que posee. Si bien, la central hidroeléctrica Angostura es la que se ubica más aguas abajo, esta no posee capacidad de regulación de los caudales evacuados en Pangué, no sólo porque su capacidad de embalse es significativamente menor sino porque las regulaciones impuestas por la autoridad prácticamente no le permiten realizar variaciones en el nivel de embalsamiento, en consecuencia, se limita a operar de la misma forma en que lo hace la central Pangué. De igual manera se ha desestimado proponer modificaciones en las regulaciones del embalse Ralco, ya que su régimen de operación es modificado por la central Pangué. De esta forma, se ha estimado clave la operación de la central hidroeléctrica Pangué, toda vez que es capaz de regular los caudales provenientes de la central Ralco (actuando como contraembalse) por lo que se considera como el último embalse regulador de los caudales de generación hidroeléctrica de la cuenca. A continuación, se presenta un estudio que propone algunas reglas para la descarga de caudales en la operación del embalse de la central hidroeléctrica Pangué, tendientes a aminorar los efectos del hydropeaking sobre los usuarios agrícolas de la cuenca y sobre el ecosistema fluvial del río, en el entendido que la central hidroeléctrica Angostura, ubicada aguas abajo, como las futuras centrales que se construyan reproducirán el régimen de generación. Igualmente, se presenta un análisis económico utilizando el método del Coste-Beneficio, con el que se compara del régimen actual de operación versus el régimen propuesto.

## II OBJETIVOS

### Objetivo General

Evaluar económicamente un modelo para la operación del embalse Pangue que reduzca las afectaciones de los usuarios agrícolas de la cuenca y aporte a la conservación del ecosistema fluvial del río Biobío.

### Objetivos específicos

- Determinar los principales efectos sobre el sector agrícola del actual modelo de generación de la central hidroeléctrica Pangue y estimar los costes asociados.
- Identificar los efectos del actual modelo de operación sobre el ecosistema fluvial del río Biobío.
- Identificar medidas de mitigación de los efectos del hydropeaking sobre el ecosistema y los usuarios agrícolas del río Biobío
- Diseñar y evaluar la factibilidad económica de un modelo de evacuación de caudales desde el embalse Pangue, que disminuya los efectos del hydropeaking

### III. METODOLOGÍA

En el presente capítulo, se describe la metodología utilizada para abordar los objetivos.

- 3.1** Para determinar los costes en que incurren las organizaciones de regantes, producto del hydropeaking, se realizó una entrevista personal a los directivos de las principales organizaciones de usuarios de agua de la cuenca, con el objeto conocer los impactos y costes asociados a la gestión extraordinaria, producto de las variaciones de caudal el río (hydropeaking). De igual manera, se entrevistó a dirigentes y representantes de entidades gremiales de la zona, para recopilar antecedentes técnicos y de valorización de la producción agrícola local. En atención a las condiciones sanitarias imperantes, producto de la pandemia, se realizaron todas entrevistas online y la información fue recopilada por correo electrónico.

Los costes del impacto de la generación se calcularon considerando el gasto anual que destina cada organización a la vigilancia y el control del hydropeaking, más los costes estimados por mermas en la producción en las hectáreas que se ven afectadas en sus turnos de riego debido a que, durante las bajas de caudal, no ingresa agua en sus dispositivos de entrega.

Para determinar los costes asociados a los efectos hydropeaking, se ha calculado el Coste Anual Equivalente (CAE) como la anualidad de todos los costes netos que deben asumir las tres organizaciones en estudio, en los tres ítems de gastos adicionales explicados anteriormente, utilizando la siguiente fórmula:

$$CAE = M \left[ \frac{i (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \right]$$

Donde: M= Monto a anualizar  
n= Vida útil  
i= Tasa de retorno

- 3.2** El segundo objetivo, se aborda con una revisión bibliográfica respecto de los problemas que ocasiona el hydropeaking en el ecosistema fluvial del río Biobío, buscando determinar si la operación de las centrales hidroeléctricas de embalse afecta la biodiversidad de los cauces. Para esto se realizó revisión de estudios internacionales y nacionales particulares de la cuenca del Biobío.
- 3.3** La identificación de las medidas de mitigación de los efectos del hydropeaking, se realizó mediante una revisión bibliográfica de estudios a nivel internacional, desde donde se obtuvo tanto la clasificación de las medidas que se adoptan en este sentido, como las restricciones que presenta su aplicación, a partir de lo cual se seleccionaron las medidas que se ajustan de mejor manera a la realidad de cuenca en estudio.
- 3.4** Para el objetivo de construir un modelo de generación, que permita disminuir los efectos del hydropeaking en la cuenca del Biobío, se consideraron los principales efectos descritos en la revisión bibliográfica anterior y que se manifiestan en forma evidente en el cauce del río Biobío. De esta manera, se propone un modelo que permita evitar los principales impactos ocasionados por el hydropeaking en esta cuenca. Para lo anterior, se determinaron las tasas de subida y bajada de caudal a proponer persiguiendo el menor impacto económico a las centrales hidroeléctricas, por lo que se probaron varios escenarios de evaluación mediante iteraciones. El tiempo actual promedio que utiliza la generadora para tomar o reducir la carga se calcula como:

$$T = \Delta Q / t_a \text{ (min)}$$

donde  $\Delta Q$  es la variación de caudal ( $m^3/s$ ) y  $t_a$  es la tasa de variación actual del caudal en un minuto en ( $m^3/s$ )

Las variaciones de caudal tanto para ascenso y descenso se calcularon de la siguiente manera:

$$\Delta Q_{asc} = Q_{Max} - Q$$

$$\Delta Q_{desc} = Q - Q_{Min}$$

donde:  $Q_{max}$  es el caudal medio máximo,  $Q_{min}$  es el caudal medio mínimo y  $Q$  es el caudal medio. Todos los valores para un mismo mes.

Una vez determinado el tiempo que se requiere para modificar el caudal, se realizaron iteraciones variando las tasas y se determinó el tiempo adicional que tomará a la empresa de generación asumir la nueva consigna en su tasa de aumento o disminución del caudal. La tasa adicional se determinó como:

$$t_{ad} = t_a - t_p \text{ (m}^3\text{/s) en un minuto;}$$

donde  $t_a$  es la tasa actual y  $t_p$  es la tasa de variación de caudal propuesta.

Con la tasa adicional se calculó el tiempo adicional empleado y la pérdida en generación para cada mes según el costo marginal promedio informado por el CEN, como:

$$P_{perdida} = t_{ad} * C_{mg} * G * Q \text{ (US\$ en un minuto)}$$

donde;  $C_{mg}$  es el costo marginal en (US\$/Mw-h) y  $G$  es la generación media (Mw-h) y  $Q$  es el caudal medio en (m<sup>3</sup>/s)

El beneficio para la situación actual se determinó como la diferencia entre un ingreso constante de la empresa menos el coste de cada una de las afectaciones detalladas anteriormente.

$$B = I - C$$

donde  $I$  es el ingreso de la empresa para el periodo (US\$) y  $C$  es el coste calculado para el escenario en evaluación (US\$)

De la misma manera, que para el escenario actual, se calculó el CAE para el

escenario propuesto, asumiendo que no existen costes adicionales para las organizaciones de regantes y sus agricultores, por lo que el monto que debe asumir la empresa de generación eléctrica está dado por el menor ingreso producto de la nueva consigna de generación.

Con estos antecedentes, se realiza un Análisis Coste Beneficio (ACB) mediante la valoración comparada de ambos escenarios. Se realiza un análisis diferencial de los CAE para la situación de operación actual del embalse pague (CAE<sub>1</sub>) versus desembalsar las aguas según la propuesta (CAE<sub>2</sub>).

**CAE<sub>1</sub> = Coste para las OUA + Coste para los agricultores**

**CAE<sub>2</sub> = Coste para la empresa por menor generación**

El beneficio de la situación actual (B<sub>1</sub>) se calculó, para la empresa hidroeléctrica, como los ingresos de la generación menos los costos que esta empresa debiera asumir por los efectos del hydropeaking. En tanto el beneficio para la situación propuesta (B<sub>2</sub>), se calcula considerando los mismos ingresos menos los costos que deberá asumir por la regulación del caudal, de esta manera se tiene que:

$$B_1 = I_1 - C_1 \qquad B_2 = I_2 - C_2$$

Donde  $I_1 = I_2$

El beneficio neto (B<sub>n</sub>) se calcula por análisis diferencial como:

$$B_n = B_1 - B_2 = CAE_1 - CAE_2$$

Finalmente se determina el índice B/C para el escenario propuesto, donde B corresponde al beneficio obtenido por los agricultores y C los costos que debe asumir la hidroeléctrica por la menor generación.

## IV. MATERIALES Y DESCRIPCION

### 4.1 Efectos del hydropeaking sobre las OUA y los usuarios agrícolas

Las organizaciones de regantes, han identificado diversos problemas que ocasiona la variación brusca de los caudales, como: mala percepción de los usuarios de los canales de riego; destrucción de las laderas de los canales sin revestir; fallas en elementos mecánicos por exceso de manipulación para mantener más estable los niveles; variabilidad en la generación hidroeléctrica al interior de la red de canales; puntos de entrega ubicados en cotas altas que requieren el canal esté a plena carga para operar, afectados por una menor o nula cantidad de agua a la que tienen derecho; turnos de riego perdidos por los regantes debido a disminuciones bruscas que no permiten entregar agua en el dispositivo de entrega. Tanto las pérdidas de turnos de riego, cómo los problemas de admisión en cotas altas se asocian a pérdidas de cultivos.

A continuación, se describen algunos de los problemas que generan costes adicionales medibles producto del hydropeaking a las OUA y sus agricultores:

- Aumento de vigilancia y operación de compuertas para el control y distribución del agua: Este ítem supone una mayor contratación de personal por parte de la organización, que permita aminorar la intensidad, duración y frecuencia de las variaciones de caudal dentro de la red de riego. En todos los casos se reconoce que no se puede eliminar el efecto sólo con esta medida, especialmente porque debe verificarse la alteración del nivel para luego actuar sobre los mecanismos de control. Esto debido a que todas las organizaciones en estudio cuentan con sistemas manuales o mecanizados para el accionamiento de las compuertas, pero no poseen actuadores automáticos asociados a las variaciones de nivel.
- Aumento en mantención de la red de canales sin revestir y en los sistemas mecánicos de control y distribución: En este caso, la organización debe destinar más recursos a la mantención de los canales



y sus mecanismos, ya que, en ellos ocurre un deterioro acelerado. Es el caso de los canales que escurren sobre una matriz inestable de suelo y cuyos muros se destruyen en forma acelerada, conocido como efecto seco-mojado, que se gatilla debido a un ciclo de aumento de nivel del agua que moja la porción superior del suelo y una disminución brusca que deja esa porción con un mayor peso y sin la fuerza hidrostática por lo que tiende a quebrarse y caer. De igual manera, los sistemas de accionamiento de las compuertas (usillos, tuercas y guías) se deterioran aceleradamente debido a la constante manipulación en ascenso y descenso.

- Disminución de ingresos en los agricultores que pierden sus turnos de riego producto de las variaciones del caudal: Esta situación se da en los sectores en que, por diversas razones, poseen una insuficiente capacidad de conducción de los canales o los caudales a distribuir son muy pequeños, lo que obliga a la organización a distribuir el agua por turnos de riego, es decir, estos agricultores sólo pueden regar durante algunos días del mes o algunas horas del día. Mientras más cortos los tiempos de riego y mayor sea la frecuencia (entiéndase frecuencia cómo días transcurridos desde el último riego) serán más críticas las consecuencias de las variaciones de nivel en los canales, debido a que dichas variaciones se asocian directamente a mermas productivas o a pérdidas totales de los cultivos. De igual manera, las constantes variaciones interrumpen los caudales de riego (aumentando el tiempo necesario para regar una determinada superficie), lo que produce menores rendimientos en los cultivos al seguir regando toda el área originalmente sembrada, pero con una menor cantidad de agua.

Claudio Rojas Fonsillas ([claudio.rojasf@canalistasbiobiosur.cl](mailto:claudio.rojasf@canalistasbiobiosur.cl)), gerente de la Asociación de Canalistas Canal Biobío Sur, señala que dicha organización posee derechos por 45 m<sup>3</sup>/s y su bocatoma se ubica a 42 Km del muro del embalse Pangue y a solo 8 km del muro de la central Angostura. Posee una red de canales de 800 km de longitud para el riego de 40.000 hectáreas. En la actualidad tiene un gasto anual €5.000 por conceptos de vigilancia directa

del hydropeaking, mientras que un 9.5% de la superficie regada por esta organización, recibe el agua por entregas ubicadas en las partes altas de los canales, que se ven afectadas durante los caudales mínimos de generación. Al respecto, cabe destacar que una parte importante de la red de distribución hasta los predios es realizada por los propios agricultores, ya que la red encargada a esta organización incorpora solo canales principales. Dicha situación podría estar subestimando la superficie afectada por las disminuciones extremas de caudal en la red principal y en especial los predios sometidos a turnos de riego, sin embargo, se calcula que al menos el 2.1% de la superficie regada con el sistema ha perdido la capacidad de regar con seguridad. También estima que una importante superficie ha variado su destino desde el uso agrícola al uso forestal debido a que sus producciones no se relacionan tan directamente con la oportunidad de recibir el agua. Adicionalmente, esta organización posee una serie de minicentrales hidroeléctricas que se ven afectadas en su operación debido a las variaciones de los niveles del canal, sin embargo, en el presente estudio no se han considerado dichos perjuicios económicos toda vez que la función principal de la organización es la distribución del agua de riego y por lo tanto dichas disminuciones también podrían ser explicadas por otras necesidades de la organización de regantes. Esta organización ha avanzado fuertemente en la implementación de sistemas que permitan aminorar las variaciones del nivel de las aguas dentro de la red, como es la contratación de personal adicional para el control de las compuertas de aducción en la toma principal y la implementación de sistemas de medición, transmisión de datos en tiempo real y control remoto de compuertas. Sin embargo, advierten que estas últimas son inversiones incipientes y aún no se realizan en las compuertas principales que controlan la aducción desde el río, por lo que están lejos de tener el control total de los caudales en toda la red de canales que administran.

Rodrigo Romero Jara ([canalbio@123.cl](mailto:canalbio@123.cl)) gerente de la Asociación de Canalistas Canal Biobío Norte, ha documentado derechos por 15 m<sup>3</sup>/s y su bocatoma se ubica a 20 Km del muro del embalse Angostura que, como se dijo, es el punto donde se reproduce la operación de los caudales generados en la central Pangué. Posee una red de canales 150 km de longitud y riega 12.000 hectáreas. En la actualidad tiene un gasto anual €6.000 por conceptos

de vigilancia directa del hydropeaking. Poseen un 13% de la superficie regada que recibe por entregas ubicadas en las partes altas de los canales y un 2.55% de la superficie se le administra agua por sistemas de turnos que se ven afectadas durante los caudales mínimos de generación. Este canal posee una bocatoma rústica que deriva sus aguas mediante una ataguía (azud) de material fluvial y ha identificado como una de las mayores afectaciones la destrucción de esa ataguía producto del despacho de caudales en forma violenta, lo que obliga a reconstruirla regularmente, afectando superficie importante de riego durante el tiempo que lleva su reposición.

Peter Schmohl Becker, Gerente Regional Biobío y Ñuble de la empresa sanitaria ESSBIO ([peter.schmohl@essbio.cl](mailto:peter.schmohl@essbio.cl)), ha señalado que la empresa posee una bocatoma ubicada en la ciudad de Santa Barbara, donde el agua es captada mediante un dren colector lateral al río. Con un solo 31 l/s de derechos en ese punto y debido a los descensos del nivel durante el verano, esa captación, durante varias horas al día, no le es posible extraer agua por lo que deben recurrir a camiones aljibe para suplir el abastecimiento de la población. Reconoce que, si bien existen soluciones técnicas que pueden aminorar el problema, la autoridad fiscalizadora es estricta y burocrática a la hora de modificar los puntos de captación.

Victor Cuevas Tarrasón, presidente de Asociación de Canalistas Canal Biobío Negrete ([vcuevast@gmail.com](mailto:vcuevast@gmail.com)), posee derechos por 28 m<sup>3</sup>/s, de los cuales 18 son destinados al riego y 10 a la generación hidroeléctrica. Su bocatoma se ubica a 60 Km del muro del embalse Angostura y posee una red de canales de 200 km de longitud para regar 14.000 hectáreas. En la actualidad tiene un gasto anual €4.000 por conceptos de vigilancia directa del hydropeaking, mientras que un 11.5% de la superficie regada posee entregas ubicadas en las partes altas de los canales y un 2.4 % de la superficie total debe regar con sistema de turnos, que se ven afectadas durante los caudales mínimos de generación. En este caso, los mecanismos de operación son muy antiguos y no permiten operar adecuadamente las compuertas de bocatoma, por lo que el control de los caudales en ese punto sólo permite aminorar los efectos del hydropeaking para caudales extremos, lo que se traduce en una aducción

permanentemente variable del caudal.

Por otro lado, José Miguel Stegmeier Schmidlin ([jmstegmeier@gmail.com](mailto:jmstegmeier@gmail.com)) presidente de SOCABIO (Sociedad Agrícola Biobío) y Boris Solar Ravanal ([bsolar@bsolar.cl](mailto:bsolar@bsolar.cl)) coordinador del centro regional de información de grupos de transferencia tecnológica en agricultura, han aportado estudios que señalan una la rentabilidad promedio anual de las zonas regadas (frutales y cultivos industriales) es de €1.500 por hectárea, en tanto que las mermas por riegos deficientes las estiman en un 30% de dichas utilidades, lo que parece conservador al considerar que la mayoría de los cultivos en la zona de estudio presentan un Factor de Respuesta al Rendimiento ( $K_y$ ) igual o mayor a 1, según estudio “Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua” presentado por FAO (2012). Esto significa que dichos cultivos tienen una disminución directamente proporcional a la disminución en del uso del agua ( $K_y=1$ ) o, la respuesta del cultivo es altamente sensible al déficit hídrico con una disminución del rendimiento proporcionalmente mayor que la disminución del agua debido al estrés ( $K_y > 1$ ). Notar que, para ciertos estados fenológicos, los cultivos pueden presentar valores muy superiores para este indicador. A su vez, los estudios de las agrupaciones locales concluyen que la rentabilidad de los cultivos de secano en promedio no supera los €750 por hectárea.

Desde la información entregada por las organizaciones de usuarios de agua afectadas se ha calculado que, el deterioro permanente que sufren tanto los canales que se conducen en terreno natural como los sistemas de operación y control que deben ser operados en forma constante, producto de hydropeaking, imponen un coste adicional promedio de inversión en infraestructura, para las tres organizaciones estudiadas, entre un 3 % y 5% del presupuesto anual de la organización.

La tasa de retorno utilizada para calcular el CAE se determinó en un 8%, considerando que “la tasa de descuento que debe utilizarse para actualizar los flujos de caja de un proyecto ha de corresponder a la rentabilidad que el inversionista le exige a la inversion por renunciar a un uso alternativo de esos recursos, en proyectos de niveles de riesgos similares” (Sapag y Sapag.

1999), valor que es aceptado para la evaluación de proyectos del sector Agrícola.

#### **4.2 Efectos del hydropeaking sobre el ecosistema fluvial del Río Biobío**

Diversos autores han expuesto la importancia de los ecosistemas fluviales y los impactos que estos sufren producto del hydropeaking. Según señala DeBoer et.al. 2019., las extensas riberas fluviales se encuentran entre los ecosistemas más productivos de la tierra y los más afectados por los seres humanos. En tanto, la modificación de los regímenes de flujo natural altera la abundancia y composición de las condiciones biológicas en los ambientes acuáticos. Así, las represas afectan los ecosistemas fluviales de varias formas. Alterando las fluctuaciones naturales de los caudales, modificando las características fisicoquímicas del agua fluvial y fragmentando la continuidad de los ríos (Vaikasas et al. 2013). En consecuencia, el régimen de caudal de un río es fundamental para determinar sus características ecológicas. Se ha documentado que el embalse de los ríos impacta severamente el régimen de flujo natural, lo que resulta en cambios abióticos y bióticos en los ecosistemas río abajo (Gillespie et al, 2014).

Meier et al (2015) realizó la traducción de la tabla desarrollada por Baumann y Claus (2003), donde se identifican impactos ecológicos de hydropeaking. Dicha tabla deriva de una extensa revisión de trabajos científicos y, según señala el autor, es el resumen más completo a la fecha al considerar las menciones de 240 trabajos. En dicho estudio se muestran afectaciones a la morfología del cauce, a sus parámetros hidráulicos, a la calidad del agua (especialmente la temperatura), a los hábitats acuáticos, a la estructura de la comunidad biológica, a la estructura de Macrozoobentos e Ictiofauna y a la función en peces juveniles, entre las de mayor relevancia.

Si bien la relevancia de los impactos del hydropeaking es sitio específica, ya que depende de las características particulares del cauce, de la cuenca, de los embalses, de las descargas, de la ecología local y de la distancia desde el punto de descarga al lugar de medición del impacto, entre otros factores, se

han identificado otros impactos asociados a los usos aguas abajo como en la agricultura, la pesca, la recreación y en la propia percepción de los usuarios que utilizan aguas luego de que estas han sido generadas en los embalses. En tal sentido, de acuerdo con lo investigado por Meier et al (2015), en el trabajo desarrollado por Faure (2000), los usuarios identificaron, entre otros, peligro para la vida de las personas, serias limitaciones para el desarrollo de actividades debido a lo impredecible de las fluctuaciones y la degradación de infraestructura como la pérdida de materiales como caminos o embarcaciones.

Para la realidad de Chile, en el trabajo desarrollado de Meier et al (2015), se demuestra que todos y cada uno de los 40 ríos seleccionados, como posibles candidatos a sufrir hydropeaking, sí sufren de este fenómeno, mientras que en sólo 3 de esos ríos se tiene que el hidrograma turbinado guarda alguna semejanza con un hidrograma en régimen natural y que 25 tienen fluctuaciones consideradas intermedias o altas. De esta manera, viéndose el régimen natural alterado de los cauces en Chile, parece evidente que el hydropeaking genera externalidades de diverso alcance y a diversos usuarios aguas abajo de las centrales hidroeléctricas que descargan directamente a cauces naturales sin obras de mitigación para sus efectos.

Particularmente, la cuenca del río Biobío del centro-sur de Chile exhibe la mayor riqueza de especies de todos los ríos del país y su cauce principal es uno de los ríos más importantes para el uso humano. El uso de sus aguas para el suministro de agua potable, riego, efluentes de aguas residuales, generación de energía hidroeléctrica y la industria, han aumentado dramáticamente durante la primera década del siglo XXI. Para ayudar a comprender los efectos de las actividades humanas en el río Biobío, se han documentado los cambios recientes en la comunidad de peces, en tal sentido, la comparación con registros anteriores indica pérdida o reducción en la distribución de especies nativas y una expansión concurrente en la distribución, además de abundancia de especies introducidas tolerantes durante los últimos 10 a 15 años. Estos hallazgos sugieren un efecto a gran escala y a largo plazo de los recientes impactos humanos en el río (Habit et al, 2006). Adicionalmente, en las evaluaciones de impacto ambiental no se

han considerado los impactos debido a la operación con horarios en punta (Hydropeaking), como tampoco los efectos acumulativos de la construcción consecutiva de embalses y que, la presencia de las centrales en el Alto Biobío, ha provocado la disminución y fragmentación de especies de bagres nativos clasificados “En peligro”. Según se ha demostrado en estudios recientes, la especie endémica de la cuenca del Biobío “Carmelita de Concepción” (*Percilia Irwini*) ha sido extirpada del tramo ubicado entre la Central Ralco y la Central Pangue y que su abundancia se está reduciendo rápidamente en la zona entre la Central Pangue y la central Angostura. (EULA, 2020)

Finalmente, se puede constatar en publicaciones de prensa local, que las variaciones bruscas de altura de agua, tanto en el lago Ralco como en el río Biobío aguas abajo de este embalse, han provocado accidentes graves con pérdidas de vidas humanas que han sido atribuidas al aumento violento del caudal, a su vez provocan molestias en los usuarios de las riveras, para la pesca, el baño y la navegación. Dentro de estas afectaciones no valorizadas, resulta particularmente conflictivo el que las empresas sanitarias deban recurrir a otras fuentes para abastecer la población debido a las disminuciones de la altura de agua en la zona de captación.

A continuación, se presentan antecedentes generales de los caudales de río Biobío y un detalle mensual de las tasas de ascenso y descenso del caudal. Todos los datos utilizados en la presente evaluación corresponden a la estadística oficial de caudales del año 2019.

**Tabla 1.** Caudal medio mensual, caudal máximo promedio y caudal mínimo promedio para el año 2019.

<u>Caudales promedios anuales, año</u>	
<u>2019 (m<sup>3</sup>/s)</u>	
Q Medio	235.16
Q Max	459.24
Q Min	87.72

Fuente: Elaboración propia a partir de estadística de caudales DGA, estación Rucalhue, año 2019

**Tabla 2.** Caudales mínimos y máximos absolutos ocurridos en horario de punta y horario de valle durante el año 2019

<u>Caudales mínimos y máximos</u>		
<u>registrados año 2019 (m<sup>3</sup>/s)</u>		
	Mayor valor	Menor valor
Caudal horario punta	608.80	171.50
Caudal horario valle	115.00	5.80

Fuente: Elaboración propia a partir de estadística de caudales DGA, estación Rucalhue, año 2019



**Tabla 3.** Tasas máximas de ascenso y descenso de caudal, para cada mes del año 2019

Mes	<u>Tasas máximas de variación en un minuto (m<sup>3</sup>/s)</u>	
	Ascenso	Descenso
Enero	1.63	-3.69
Febrero	1.89	-2.38
Marzo	1.91	-1.63
Abril	1.02	-0.75
Mayo	2.61	-2.50
Junio	3.88	-3.39
Julio	3.98	-3.74
Agosto	4.27	-4.94
Septiembre	5.10	-4.42
Octubre	6.50	-3.69
Noviembre	3.78	-4.29
Diciembre	3.65	-4.93

Fuente: Elaboración propia a partir de estadística de caudales DGA, estación Rucalhue, año 2019

#### **4.3 Identificación de medidas de mitigación de los efectos del hydropeaking sobre el ecosistema fluvial y los usuarios agrícolas del río Biobío**

Los estudios sobre el hydropeaking, han propuesto variadas medidas tendientes a disminuir e incluso evitar sus impactos ya que, las variaciones de caudal en forma continua y los picos de descarga, tienen una serie de consecuencias no sólo en otros usuarios, como los agrícolas e industriales que deben absorber esas variaciones de caudal en sus sistemas captación y distribución, sino que, como se mencionó anteriormente, hay una seria afectación al ecosistema fluvial y a otros tipos de usuarios y organizaciones. Esta condición de afectación a terceros que produce la hidrogenación con el hydropeaking, genera conflictos de distinta índole en la cuenca del Biobío que complejizan la convivencia entre los usuarios y es esperable que dichos conflictos se sucedan con mayor intensidad en la medida que el estrés

hídrico aumente.

En el entendido que es difícil y sobre todo costoso evitar o eliminar los efectos del hydropeaking, parece necesario, al menos, plantearse medidas de mitigación de esos efectos, que nos propongan un escenario futuro de mayor sostenibilidad, en una mirada tendiente a equilibrar la importancia económica de la generación hidroeléctrica de punta con sus negativos efectos sociales y medioambientales. Al respecto, existen estudios y legislación internacional sobre la mitigación de los efectos del hydropeaking, donde se abordan diversos aspectos de acuerdo con las características propias del cauce afectado, a la vez que se realizan diversas clasificaciones de estas medidas según el impacto que generan o el tipo de intervención que se requiere. En el presente trabajo, se abordan las medidas que más se adaptan a las características de funcionamiento del cauce principal del río Biobío, de manera que sea viable su implementación en el corto o mediano plazo.

En la investigación desarrollada por Meier et al (2015), establece que pueden usarse medidas de mitigación para mejorar el estado ecológico de ríos y lagos impactados por hydropeaking, las que pueden clasificarse en tres tipos. A saber:

- 4.3.1 Medidas operacionales; Restringen la operación de la central hidroeléctrica, fijando umbrales para entrega de agua en el cauce. Las más comunes intentan atenuar la magnitud de los peaks (razón entre caudal máximo y mínimo), disminuir las tasas de subida y bajada (ramping rates) y mantener un mayor caudal mínimo entre eventos. Estas medidas buscan evitar o minimizar la varazón de peces, la deriva de macroinvertebrados y la reducción en la disponibilidad y diversidad de hábitats de peces.
- 4.3.2 Medidas estructurales: Se consideran obras hidráulicas como contraembalses, cavernas de almacenamiento, cauces adicionales para abastecer lugares específicos, entre otras. El principal objetivo de estas estructuras es reducir las fluctuaciones de caudal y temperatura del agua.

4.3.3 Medidas de compensación: Corresponden a trabajos de restauración o mantención ejecutados en el mismo cauce del río, modificando sus características, medidas de protección contra la erosión o programas de compensación para reponer hábitats perdidos.

En tanto, en el mismo estudio anterior, se detalla el trabajo realizado por Charmasson y Zinke (2011), donde se realiza una clasificación de medidas para mitigar los impactos del hydropeaking, según el efecto que se quiere evitar.

1. Evitar las variaciones de caudal y de cota:

- Descargar separadamente la totalidad o parte de los caudales turbinados, por ejemplo hacia un lago, un río de mayor tamaño, o bien una piscina de detención
- Proteger ríos con alto nivel de conservación de modo que no ocurra *hydropeaking*
- Detener la generación hidroeléctrica de punta

2. Reducir la magnitud de las fluctuaciones de caudal y de cota:

- Incrementar el caudal mínimo o ecológico liberado hacia el tramo de aguas abajo
- Disminuir el caudal máximo de operación
- Incrementar  $Q_{min}$  y disminuir  $Q_{max}$  simultáneamente
- Limitar la razón  $Q_{max}/Q_{min}$

3. Atenuar las tasas de aumento (subida) y disminución (bajada) de los caudales y cotas:

- Reducir las tasas de bajada del caudal (disminuir  $dQ/dt$ )
- Reducir las tasas de bajada de cota (disminuir  $dh/dt$ )
- Disminuir las tasas de bajada y de subida de caudal o de la cota

4. Mejoramientos estacionales, sea reduciendo la magnitud de las fluctuaciones o de las tasas:

- Modificar los requerimientos de caudal según la fase biológica de los organismos
- Causar crecidas durante períodos de bajos caudales para inducir migraciones

- Evitar atraer peces hacia la restitución de la central
  - Desarrollar regímenes flexibles de caudales ambientales
5. Reducir o evitar las fluctuaciones de la temperatura del agua (*thermopeaking*):
- Proveer hábitat con buenas condiciones de temperatura
  - Atenuar las fluctuaciones de temperatura
  - Liberar aguas con régimen de temperatura adecuado a las necesidades ecológicas
6. Minimizar el área afectada por secado y mojado (expandir área constantemente inundada):
- Reperfilarse/rediseñar el cauce mediante estructuras in-situ; restaurar el tramo
  - Ensanchar el cauce
7. Reducir la propagación de las ondas de *hydropeaking*:
- Encontrar la mejor forma al reperfilarse las riberas, de modo de reducir la reflexión de ondas
8. Mejorar la calidad del río o restaurar el río:
- Crear lechos para desove
  - Construir refugios para peces y/o invertebrados
  - Diversificar el hábitat físico para peces y/o invertebrados
  - Crear proyectos multi-propósito, combinando diferentes medidas
  - Liberar crecidas artificiales para renaturalizar el río
- Reducir la infiltración de sedimento fino en el lecho de tramos con *hydropeaking*.

Finalmente, Meier et al (2015) detalla las acciones de mitigación de los efectos del *hydropeaking* descritas por EPIDOR (2001) donde, coincidentemente con los otros estudios, propone acciones con el fin de lograr un acuerdo-marco para dicho objetivo. Si bien ese no es el objeto del presente estudio, resulta interesante analizar las medidas propuestas para el manejo de los caudales, según se muestra a continuación.

### **Acción 1: Caudal mínimo**

El aumentar los caudales mínimos (“caudales ecológicos” según la terminología chilena) implica modificar las reglas de gestión de los volúmenes

almacenados en los distintos embalses ubicados aguas arriba de los tramos de interés. Tales cambios se traducen en nuevas restricciones que modifican la rentabilidad económica de las centrales, redundando en un perjuicio económico causado por el diferencial de producción, en relación con las condiciones de funcionamiento actual.

### **Acción 2: Actuar sobre los gradientes**

Mediante el análisis hidráulico, se establecieron relaciones características entre el caudal y el ancho mojado. Para caudales contenidos dentro del cauce menor, los gradientes de variación (o *ramping rates*) deben ser inferiores a 20 cm/h para evitar impactos ecológicos. Cuando el cauce menor ya está cubierto, los cambios de caudal casi no afectan el ancho mojado, pudiendo entonces usarse gradientes mayores, aunque aquí ya deben considerarse los aspectos relacionados con la seguridad de las personas. El reducir los gradientes otorga menos flexibilidad en el uso de los volúmenes, y por ende en la optimización económica de una serie de centrales.

### **Acción 3: Actuar sobre el medio**

La compensación o limitación de los efectos de la generación de punta sobre la fauna mediante medidas de restauración del cauce y sus riberas constituye aún un tema exploratorio, que guarda relación con la ingeniería ecológica, tal como el diseño de obras para el paso de peces. En consideración a la ausencia de experiencias significativas, se proponen proyectos experimentales, con acciones limitadas en el tiempo y espacio, que cubran distintos aspectos. Algunas de estas acciones necesitarán de autorizaciones por modificación del cauce.

#### **➤ Creación de refugios faunísticos**

En aquellos tramos más encajonados, el impacto de las fuertes variaciones de cota y velocidad puede verse reducido creando estructuras de refugio.

➤ **Actuar sobre los brazos muertos y cauces laterales**

Las condiciones hidrológicas que resultan en hábitats degradados, con riesgo de entrapamiento para la fauna acuática, en los brazos muertos y cauces laterales, puede mitigarse con medidas de restauración física del lecho.

#### **4.4 Propuesta y evaluación económica de un modelo evacuación de caudales para la central Pangue**

El régimen de evacuación de caudales, con el exclusivo objetivo de generar energía desde el embalse Pangue en la actualidad es impredecible, tal es, una de las principales características de las centrales hidroeléctricas que generan en punta. Por tal motivo, a continuación, se describen algunos parámetros de caracterización de los caudales de generación actuales, en la central hidroeléctrica Pangue, que resultarán de interés para la propuesta de evacuación que se propondrá

**Tabla 4.** Caudal, duración y tasa de variación, estación Rucalhue, río Biobío, 2019

Caudal mínimo evacuado	30 m <sup>3</sup> /s
Caudal medio anual	450 m <sup>3</sup> /s
Caudal máximo turbinado	500 m <sup>3</sup> /s
Duración media de caudales mínimos	6 h
Duración media de caudales máximos	3 h
Tasa máxima de variación de caudal en ascenso	6.5 m <sup>3</sup> /min
Tasa máxima de variación de caudal en descenso	5 m <sup>3</sup> /min

*Fuente: Elaboración propia a partir de estadística de caudales DGA, estación Rucalhue, año 2019*

Si bien durante la época de crecidas los caudales evacuados superan el caudal turbinado, este no se considera en la propuesta de manejo futuro, debido a que corresponden a caudales que deben ser administrados según las reglas de operación de seguridad del embalse, en consecuencia, dichos caudales no tienen un efecto económico en las alternativas de estudio, ya que se operan con compuertas de vertimiento.

Finalmente, cabe señalar que, en el presente estudio, no se han estudiado los efectos acumulativos del funcionamiento en serie de las centrales hidroeléctricas presentes en la cuenca.

### **Propuesta**

En la presente propuesta de operación de la central hidroeléctrica Pangué, se ha tenido en cuenta la factibilidad técnica y económica de operar en un régimen de menor impacto por hydropeaking, las características particulares de las regulaciones eléctricas del país, el modelo de derechos de aprovechamiento de aguas en Chile, la importancia gravitante de la generación hidroeléctrica para la economía, la necesidad de establecer una condición de mínimo conflicto para enfrentar condiciones futuras de escasez y la necesidad de proteger los ecosistemas para una adecuada conservación del recurso, entre los principales aspectos.

Para lo anterior, se proponen dos líneas de acción. La primera es actuar con medidas operacionales sobre las regulaciones del caudal evacuado desde la central, tendiendo a disminuir algunos de los principales efectos del hydropeaking descritos anteriormente. Una segunda línea de acción propone actuar sobre los sistemas de comunicación e información hacia los usuarios y la sociedad civil que pudiera verse afectada en la cuenca producto de la operación de la central Pangué.

Se han desechado las alternativas de construcción de infraestructura por resultar inviables debido al alto monto de inversión. Al respecto, una alternativa es intervenir todos los sistemas de extracción ubicados bajo el muro del embalse, lo que implica un acuerdo con prácticamente todos los usuarios del río, para automatizar las captaciones y así evitar los efectos del hydropeaking en esos puntos, sin embargo, si bien esta alternativa disminuye la conflictividad entre los usuarios, no contribuye a mejorar la condición del ecosistema fluvial. Una segunda alternativa sería la construcción de un contraembalse que, si bien aporta a estabilizar los caudales y no tiene la complejidad de intervenir cada aducción aguas abajo del muro, si requiere una

inversión muy alta debido a que la hidrología de la cuenca entrega caudales de diseño de gran magnitud que deberán ser gestionados en dicha obra.

A continuación, se muestran las acciones escogidas como más factibles de implementar, con el objetivo de aminorar los impactos de hydropeaking ocasionado por la operación de la central hidroeléctrica Pangué.

❖ **Acciones sobre el caudal:** Se abordarán tres tipos de intervenciones sobre el caudal, que resultan ser las más evidentes en cuanto cumplir las expectativas de los usuarios aguas abajo y, a la vez, son las que tienen un impacto más inmediato en la conservación del ecosistema fluvial del Biobío.

➤ **Caudal mínimo:** Se estima necesario establecer un caudal mínimo de evacuación, que asegure el abastecimiento de los derechos concedidos aguas abajo de las centrales, junto con brindar un caudal mínimo ecológico que mantenga algunas condiciones esenciales para la conservación del ecosistema fluvial, al menos aguas abajo del muro de la central Pangué. Esta condición de evacuación de caudal, no es óptima desde el punto de vista de la eficiencia en la generación, sin embargo, debido a que el embalse generado por la represa Pangué no permite una acumulación de temporada, sino que solo un almacenamiento de algunas horas, el cambio en el caudal mínimo deberá ser impuesto a todos los embalses que funcionan en la cuenca, especialmente al embalse principal de la hidroeléctrica Ralco. En consideración a este aspecto de eficiencia económica, se han propuesto caudales mínimos muy ajustados a cubrir las necesidades de los demás usuarios, junto con evitar que algunos tramos del río queden secos. El caudal mínimo permite, además, que los usuarios puedan establecer rangos mínimos de funcionamiento de sus equipos y sistemas de aducción, como también aporta seguridad en el abastecimiento al interior de los canales de riego.

El caudal mínimo propuesto se determinó de acuerdo al registro de niveles fluviométricos en las bocatomas de las asociaciones de regantes, de manera de permitir una adecuada captación de sus derechos, registros que fueron correlacionados con la estadística fluviométrica de la DGA.



- Tasa de bajada de caudal: La tasa de bajada es uno de los aspectos ambientales más importantes, debido a la escasa capacidad de reacción que tienen las especies ribereñas endémicas del río Biobío. Atenuar la tasa de disminución del caudal asociado al caudal mínimo de evacuación, se espera que otorgue condiciones más favorables al ecosistema fluvial en su conjunto.
  
- Tasa de subida de caudal: La tasa de ascenso de caudal, asociada a los aumentos por demanda en la generación, ofrece los principales riesgos para la infraestructura hidráulica y para la población que utiliza el río en deporte y recreación. El disminuir la tasa de ascenso de caudal permite, esencialmente, dar tiempo de reacción a los usuarios de aguas abajo y evitar accidentes.
  
- ❖ **Acciones sobre la comunicación**: Si bien este tipo de intervención no se encuentra descrita en la bibliografía expuesta en este documento, la comunicación aparece como un elemento central en los modelos de gobernanza de los recursos hídricos actuales, por lo que se ha estimado necesario realizar una propuesta de mejoramiento en la comunicación que permita establecer una plataforma mínima para la gobernanza y la gestión de las aguas en la cuenca, lo que se espera tenga un impacto importante en la disminución de los conflictos.
  
- Información en tiempo real: Se ha estimado establecer un centro de control de acceso universal de la información en tiempo real de caudales y alturas limnimétricas para distintos tramos del río, que permita la sociabilización y el conocimiento de la población y especialmente el de los usuarios del río aguas abajo del muro de la central. Esta exigencia se espera que no signifique un coste adicional de importancia para la empresa generadora toda vez que, en la actualidad, posee los sistemas de medición y transmisión de datos en tiempo real, sin embargo, se debe aumentar la red de puntos y generar una plataforma de comunicación de acceso libre y fácil para la población que otorgue transparencia, contribuyendo a mejorar las confianzas y tomar medidas para condiciones de caudales extremos.

## **Evaluación económica del modelo propuesto**

La evaluación económica se realizó comparando en CAE en dos escenarios de la operación de central hidroeléctrica Pangué, ubicada en la parte alta de la cuenca. En un primer escenario se evaluó el coste actual asumido por la empresa en la actualidad y se le sumó la valorización de las afectaciones del sector agrícola que aún no ha asumido. Estas últimas, si bien hoy no significan un coste actual para la empresa hidroeléctrica, si corresponden a un coste asociado al modelo actual de generación y SOCABIO estima que podrían ser exigidas por los agricultores si no se mejora el modelo de generación en el mediano plazo. El segundo escenario, con el que se comparará el anterior, considera el coste anual equivalente, que resulta para la misma empresa, la menor generación producto de adoptar las medidas propuestas en el presente trabajo, es decir asumiendo un caudal mínimo mayor al actual, reduciendo las tasas de aumento y disminución de caudal e implementando un centro de control para la información. Para el caso de este último escenario, se dispone de la estadística de precios del Coordinador Eléctrico Nacional para el año 2019 y de la estadística de caudales evacuados por la central hidroeléctrica Pangué durante el mismo periodo, correspondiente a la estadística oficial de la Dirección General de Aguas obtenida vía una solicitud a la oficina local ([Rafael Esteban Perez Rodriguez \(DGA\) <rafael.perez@mop.gov.cl>](mailto:rafael.perez@mop.gov.cl)). Finalmente se ha agregado el coste de inversión, por parte de la empresa, de un centro de control de información de caudales evacuados y una plataforma virtual de acceso público a la información vía transparencia.

(<https://www.coordinador.cl/mercados/documentos/transferencias-economicas/costos-marginales-de-energia/2019-costos-marginales-de-energia/>)

### **Cálculo de coste anual equivalente para el escenario actual**

Con la información entregada por las Organizaciones de usuarios que extraen agua desde el río Biobío se determinó que, para la condición actual de operación de la central Pangué, la generadora produce un coste directo de €15.000 por año a las organizaciones de regantes, debido a la contratación de personal adicional para operar en forma continua los sistemas de aducción, con el fin de aminorar los efectos de las variaciones. Adicionalmente, se han calculado costes significativamente mayores producto del deterioro acelerado de las obras lo que se

traduce en costes adicionales de mantención. Estos costes, que han sido entregados y documentados directamente por las organizaciones de usuarios de agua, han determinado un deterioro promedio del 4% del presupuesto de la organización.

Por otro lado, se ha calculado un coste inherente a la menor producción de los agricultores, producto de las mermas ocasionadas por la entrega variable del caudal, para lo cual, según las recomendaciones de los gremios productivos consultados, se produce un 30% de menor producción en sus cultivos afectados por problemas de abastecimiento de agua. Para los cálculos, se ha considerado en ese porcentaje de afectación sobre la superficie de riego para cada una de las organizaciones de regantes en estudio. Finalmente, para este escenario, se ha calculado la pérdida de producción de las zonas sometidas a turnos como la diferencia entre la producción de riego y secano para la zona, al estimar que estos productores quedan limitados a una producción de secano al no tener segura la entrega de agua para el riego por lo que no están dispuestos a arriesgar inversión.

No se han valorizado costes ambientales asociados al hydropeaking, debido a que no existen estudios locales de valorización de las afectaciones al ecosistema fluvial que permitan una adecuada aproximación del coste que este efecto impone al ecosistema. De igual manera, se excluyó de la valorización los costes de efectos intangibles como la pérdida de vidas humanas, problemas asociados al turismo y otras afectaciones que no se encuentran claramente determinadas y por lo tanto no valorizadas.

### **Cálculo de coste anual equivalente para escenario propuesto**

Debido a que el escenario propuesto permite que la evacuación de caudales sea conocida por la sociedad, en especial por las organizaciones de regantes y considerando además que la tasa de variación de caudal, tanto en aumento como los descenso, permitirá adecuadamente a los usuarios de aguas abajo modificar los dispositivos de admisión de agua sin tener impactos de importancia en sus sistemas, a la vez que el caudal mínimo también asegura el abastecimiento de los derechos, manteniendo estable los caudales dentro de los sistemas de riego,

resulta como coste principal, para este escenario, la pérdida por generación de la central hidroeléctrica producto de los mayores caudales que deberá destinar a la generación en horario fuera de punta, ya sea por la atenuación de las tasas de ascenso y descenso como por el mayor caudal mínimo de evacuación. Este cálculo de pérdida de generación se obtiene de estimar los tiempos adicionales destinados a tomar carga (aumentar caudales de generación) como los de disminuir carga (disminuir los caudales de generación) a fin de respetar la regla de generación propuesta, debido a que se generará una parte del caudal a un precio menor al del horario punta, sin embargo, el volumen acumulado producto de la nueva consigna de operación podrá ser generado durante el periodo de menor disponibilidad de caudal, que para el año en estudio es el mes de abril, lo que se incorpora al flujo como un ingreso adicional compensatorio a la pérdida.

Si asumimos que las demás variables del negocio permanecerán constantes y no dependen del planteamiento de las alternativas en análisis, al calcular

$$B_1 = I_1 - C_1 \qquad B_2 = I_2 - C_2$$

tenemos que los ingresos de la empresa hidroeléctrica serán iguales para las dos alternativas y sólo variarán los costos que la empresa deberá asumir en ambos casos.

Así; Si queremos comparar  $B_1$  con  $B_2$  y  $I_1 = I_2 = Cte.$ , implica que bastará con con comparar  $C_1 = C_2$ ; de esta manera tenemos que los beneficios de las alternativas serán mayores mientras menores sean los costos que estas alternativas imponen a la generadora.

Entonces tenemos que:  $C_1 = CAE_1$  y  $C_2 = CAE_2$ , entonces bastará con determinar cuál es menor costo equivalente para determinar cuál es la alternativa de mayor beneficio para la empresa.

Por lo tanto, Si  $CAE_1$  es mayor que  $CAE_2$  implicará que el costo es mayor para la alternativa 1 que en 2 y, por lo tanto, el beneficio será menor para la empresa al operar en las condiciones de la alternativa 1 que la alternativa 2. Lo contrario

ocurrirá si el CAE de la alternativa 2 es mayor.

Notar que en la determinación de los costes se han excluido los costes ambientales y otros costes intangibles como la pérdida de vidas humanas atribuidas al hydropeaking. De igual manera se han excluido las pérdidas ocasionadas por este fenómeno en la operación de las minicentrales hidroeléctricas que operan al interior de la red de canales de riego. Finalmente, se ha excluido el coste que supone la interrupción del servicio de agua potable en algunos sectores producto de las dificultades para extraer agua durante el escurrimiento de los caudales mínimos.

Al coste de pérdida de generación por la variación de las tasas de ascenso y descenso de caudal, se sumó el volumen adicional generado fuera de punta por el aumento del caudal mínimo, el que tiene un coste calculado como:

$$\text{Pérdidas por aumento de caudal mínimo} = \sum_1^{12} Q_{cn} * T_n * P_n$$

Donde:  $Q_{cn}$  es el caudal complementario para suplir el caudal mínimo propuesto y el caudal mínimo actual, calculado para los meses  $n$  donde el caudal mínimo es menor al propuesto.

Los costes para la generación se calcularon para los meses de riego, esto es entre septiembre y abril, ya que en los demás meses no ocurren pérdidas asociadas a los cultivos con las que comparar.

Los costes de menor generación se obtuvieron de la información estadística de caudales del año 2019 disponible en la Dirección General de Aguas en la estación Rucalhue. El costo marginal de la energía pagado a la hidroeléctrica Pangue como la estadística de horas punta durante el mismo periodo, fueron obtenidos del Coordinador Eléctrico Nacional (CEN).

En consideración a que el agua no generada, en el escenario propuesto, quedará acumulada en el embalse, se calculó el beneficio de dicho caudal simulando su generación en el mes de abril, correspondiente al de mínimo caudal natural para ese año. De esta manera, en dicho existe un ingreso adicional para la empresa

generadora, que compensa parte de las pérdidas que se producen al aplicar el modelo propuesto, esto es mantener un caudal mínimo mayor al actual y disminuir las tasas de aumento y disminución de caudal de generación, más el costo de inversión en un centro de recopilación información fluviométrica y su disposición a la comunidad

Para este segundo escenario, se suma el coste de instalar una red hidrométrica y la operación del centro de control de información de acceso libre, el que se ha estimado en base a un proyecto desarrollado en la cuenca del Maule de similares características, denominado “Diseño de un Sistema de Gestión Integral para la calidad de Aguas en la Cuenca del Río Maule. Plan Piloto Sector Maule Norte” (2008), elaborado por la Universidad de Chile. De este proyecto se seleccionaron los ítems necesarios para establecer el centro de control diseñado cuyos costes de inversión y operación fueron actualizados según la corrección monetaria nacional del IPC (Índice de Precios al Consumidor). Los ítems considerados de ese estudio fueron el personal, la instrumentación y los gastos generales, para 3 años de operación.

Finalmente, se realizó un análisis diferencial entre la situación actual, equivalente a los costes que deben asumir las OUA y sus agricultores ( $CAE_1$ ) y la situación modificada, que corresponde al coste de imponer restricciones en la evacuación del caudal a la generadora e implementar un centro de control de la información ( $CAE_2$ ). De esta manera:

$$\text{Beneficio} = CAE_1 - CAE_2$$

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Efectos del modelo actual de generación sobre las OUA y el sector agrícola

El hydropeaking, ocasionado por la operación en punta de la central hidroeléctrica Pangué, impone a las organizaciones de regantes (OUA) y sus agricultores un CAE de €4.408.980, el que se puede desglosar en:

4.1.1 CAE que la actual operación impone a las OUA

4.1.2 CAE a los agricultores

A continuación, se presentan las tablas de cálculo del CAE para el actual modelo de operación

**Tabla 5.** Costes adicionales generados a las OUA por vigilancia y deterioro acelerado en los canales de riego (€)

<b>OUA</b>	<b>Coste Operación (€)</b>	<b>Coste Deterioro (€)</b>
AC BIOBIO SUR	5000	27.500
AC BIOBIO NORTE	6000	7.500
AC BIOBIO NEGRETE	4500	14.000
<b>Total (€)</b>	<b>15.500</b>	<b>49.000</b>
<b>CAE OUA (€)</b>	<b>64.500</b>	

*Fuente: Elaboración propia, tipo de cambio a 30 de diciembre 2020*

**Tabla 6.** Costes calculados para agricultores, asociados a las pérdidas de eficiencia de riego (€)

<b>OUA</b>	<b>Sup. Afectada (ha)</b>	<b>Menor Utilidad (€)</b>
AC BIOBIO SUR	2.400	1.719.000
AC BIOBIO NORTE	1.320	716.040
AC BIOBIO NEGRETE	1.260	723.240
<b>Total (€)</b>		<b>3.158.280</b>
<b>CAE por pérdida de eficiencia (€)</b>	<b>3.158.280</b>	

*Fuente: Elaboración propia, tipo de cambio a 30 de diciembre 2020*

**Tabla 7.** Costes asociados a las pérdidas de superficie regada destinada a secano para cada organización de usuarios (€)

<b>OUA</b>	<b>Sup. OUA (ha)</b>	<b>Sup. Afectada (%)</b>	<b>Menor Utilidad (€)</b>
AC BIOBIO SUR	40.000	1	636.600
AC BIOBIO NORTE	12.000	2	229.500
AC BIOBIO NEGRETE	14.000	1	254.100
<b>Total (€)</b>			<b>1.120.200</b>
<b>CAE por superficie sin regar (€)</b>		<b>1.120.200</b>	

*Fuente: Elaboración propia, tipo de cambio a 30 de diciembre 2020*

El hydropeaking impone un mayor costo a las OUA debido al aumento directo de los costos operacionales para evitar en parte las variaciones de caudal dentro de la red de canales de riego, lo que se traduce en un valor anual adicional para dichas organizaciones de €64.500 anuales.

Los agricultores, tanto por deficiencias en la calidad del riego ocasionadas por la intermitencia de los caudales, como por una pérdida de superficie regada, la que ha debido destinarse a cultivos de secano, debido a la suspensión del abastecimiento de agua de riego durante los turnos, tienen costes adicionales de €4.278.480 anuales.

En la actualidad la empresa hidroeléctrica paga a las OUA €15.500 al año a modo de compensación por el hydropeaking, lo que equivale al 24% de los costes adicionales directos que le impone el hydropeaking sobre la red de canales.

Los agricultores actualmente no tienen una compensación por las pérdidas económicas derivadas del hydropeaking.

Las organizaciones locales estiman que, en la medida que el estrés hídrico aumente en la zona, es altamente probable que los agricultores demanden los perjuicios ocasionados por hydropeaking.

Se han identificado varias afectaciones del hydropeaking que no han sido



valorizadas en este estudio, entre las más importantes se encuentran los problemas para la generación de otras centrales aguas debajo de Pangué, las alteraciones ambientales y los daños intangibles sobre la población.

## **5.2 Efectos del modelo actual de generación sobre el ecosistema fluvial**

Existe un potencial perjuicio al ecosistema fluvial producto hydropeaking, en especial en la población de especies endémicas y en la introducción de especies foráneas.

El ecosistema fluvial del río Biobío se está viendo seriamente afectado, siendo lo más grave la extirpación de la especie endémica “Carmelita de Concepción” (*Percilia Irwini*) desde el tramo de río ubicado entre la central Ralco y la Central Pangué. Igualmente resulta preocupante la disminución de esta misma especie en el tramo entre los embalses Pangué y Angostura.

No existe valorización económica de efecto del hydropeaking sobre el ecosistema fluvial del río Biobío que permita establecer medidas compensatorias.

## **5.3 Medidas de mitigación de los efectos del hydropeaking**

Si bien se han documentado una amplia gama de medidas tendientes a disminuir los efectos del hydropeaking, las más viables de aplicar en el caso de la realidad chilena y específicamente para la cuenca del río Biobío, se relacionan con acciones sobre el modelo de operación de las centrales hidroeléctricas de manera tal que apunten a disminuir la intensidad de hydropeaking.

Las medidas de mitigación que apuntan a realizar obras que directamente actúen sobre los caudales, se visualizan como poco viables de realizar debido al alto valor que dichas obras requieren.

La propuesta de modificación legal, actualmente en estudio en el congreso nacional, respecto de dar certeza hídrica al consumo y al riego restringiendo la generación hidroeléctrica se presenta como una oportunidad para que las

generadoras modifiquen sus regímenes de evacuación de caudal tendiente a disminuir los efectos del hydropeaking.

#### **5.4 Modelo de generación y evaluación económica para atenuar los efectos hydropeaking**

Las medidas de mitigación de los efectos del hydropeaking más factibles de aplicar a la central hidroeléctrica Pangué, propuestas en este estudio son:

- Aumentar el caudal mínimo de evacuación a 90 m<sup>3</sup>/s para cumplir en todo tiempo con los derechos de los agricultores y mantener un caudal ecológico y disminuir la relación entre caudal máximo y mínimo, en beneficios del ecosistema fluvial.
- Limitar la tasa de aumento del caudal a 3 m<sup>3</sup>/s en un minuto, con el fin de evitar accidentes en bañistas o pescadores y permitir una operación razonable de los sistemas de aducción en canales de riego.
- Limitar la tasa de disminución de caudal a 3 m<sup>3</sup>/s, con el objeto de mejorar las condiciones de vida de algunas especies que habitan el río y dar un mayor tiempo de reacción a las organizaciones de usuarios para la operación de los sistemas de admisión de agua desde el río.
- Instalar centro de control para la información pública, que permita visualizar registros de caudales y niveles fluviométricos en tiempo real, de manera que sirva de herramienta para el soporte de decisiones a toda la población para mejorar la confianza y convivencia entre usuarios y aportar un elemento efectivo de gobernanza en la gestión del agua en la cuenca del Biobío.

#### **Factibilidad económica del modelo de generación propuesto.**

El costo anual equivalente (CAE) para la operación actual de la central hidroeléctrica Pangué, tiene un valor total de **€4.408.980**

El CAE para la situación proyectada, resulta en un valor total de **€3.517.273**, el que se compone de las pérdidas por la menor generación en horas punta y la implementación, mantención y operación de un centro de control para la información de la población en un valor de €119.947

El análisis Coste Beneficio de los escenarios estudiados indica que operar las centrales con las restricciones propuestas en el modelo es un 20% más barato que cubrir los perjuicios realizados con el actual modelo de operación.

El análisis diferencial entrega un Beneficio para la empresa hidroeléctrica de **€891.707** por año si adopta las medidas propuestas con un índice de beneficio sobre coste (B/C) de **1,2535**

**Tabla 8.** Imagen planilla de cálculo de CAE para el escenario propuesto.

	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
	<b>CAUDALES MENSUALES RÍO BIOBIO DESPUES DE PANGUE (m3/s)</b>											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Q Medio (m3/s)	206	133	105	72	114	220	230	401	364	435	354	188
Q max (m3/s)	489	266	205	172	361	609	554	592	565	578	569	552
Q min (m3/s)	94	94	76	6	57	88	105	110	100	115	109	99
Dif Min-Max (m3/s)	395	173	129	166	304	521	449	482	465	463	460	453
	<b>CALCULO DE COSTE ANUAL EQUIVALENTE EN ESCENARIO PROPUESTO</b>											
US\$ /Mw-h Punta	52	111	61	118	65	54	49	52	42	59	34	36
US\$ /Mw-h Valle	33	49	47	50	50	44	39	42	31	38	28	27
Generación media punta US\$/h	9,927	13,798	5,963	7,924	6,858	10,991	10,452	19,395	14,251	23,754	11,235	6,388
Generación media valle US\$/h	6,391	6,073	4,599	3,381	5,349	9,050	8,417	15,699	10,480	15,466	9,276	4,709
Variación de caudal media Ascenso	283	133	100	99	247	389	323	191	201	144	215	363
Variación de caudal media Descenso	112	40	29	66	57	132	125	291	264	320	245	89
Diferencia tasa Ascenso	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.88	-0.98	-1.27	-2.10	-3.50	-0.78	-0.65
Diferencia tasa Descenso	-0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.39	-0.74	-1.94	-1.42	-0.69	-1.29	-1.93
Tiempo perdido Ascenso						-444.72	-330.56	-150.09	-95.77	-41.16	-275.44	-560.37
Tiempo perdido Descenso	-160.94					-335.92	-170.09	-149.53	-186.57	-466.47	-189.48	-46.33
Tiempo adicional total	-161					-781	-501	-300	-282	-508	-465	-607
Horas Punta perdidas /dia	3	0	0	0	0	13	8	5	5	8	8	10
días del mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Tiempo adicional Horas / mes	83	0	0	0	0	0	0	0	141	262	232	313
Generación en punta perdida (US\$)	825,461	0	0	0	0	0	0	0	2,011,799	6,230,135	2,611,636	2,002,378
Generación en valle adicional (US\$)	531,404	0	0	0	0	0	0	0	1,479,461	4,056,265	2,156,207	1,475,957
Costo Tasas de variación (US\$)	294,057	0	0	0	0	0	0	0	532,338	2,173,870	455,429	526,421
Ingreso perdido por potencia (US\$)	58,811	0	0	0	0	0	0	0	106,468	434,774	91,086	105,284
Ahorro caudal no generado (m3/h)	17,128	0	0	0	0	0	0	0	51,383	113,969	82,304	59,086
Volumen acumulado (m3)				323,870								
Tiempo adicional por reservas (horas)				4,485								
Generación extra en Abril (US\$)				529,262								
Derechos regantes m3/s	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
Caudal mínimo propuesto	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Diferencia caudal requerido			14	84	33	2						
Costo Caudal adicional			0	0	0	39,899						
<b>COSTO TOTAL ADICIONAL (9+10)</b>	352,868	0	0	0	0	39,899	0	0	638,806	2,608,644	546,515	631,705
<b>BENEFICIO CAUDAL ADICIONAL</b>				529,262								
<b>CAE US\$</b>	<b>4,289,174</b>											
<b>CAE €</b>	<b>3,517,123</b>											
operador	3,000,000											
gastos oficina	200,000											
supervisor de terreno	1,000,000											
EE	500,000											
cl\$	4,700,000											
									-119,947	-150		
<b>CAE ESCENARIO PROPUESTO</b>	<b>3,517,273</b>											

Fuente: Elaboración propia

## 6. CONCLUSIONES

- 6.1 Con relación a los principales efectos sobre el sector agrícola del actual modelo de generación de la central hidroeléctrica Pangué, se concluye que existe una seria afectación económica tanto a las organizaciones de usuarios agua como a los agricultores de la cuenca del río Biobío, derivada de los efectos del hydropeaking.
- 6.2 Si bien una parte de los mayores costes que el hydropeaking impone a las OUA son pagados por la central hidroeléctrica, la mayor parte de estos no están cubiertos por el plan de compensación de la empresa. En el caso de los costes que asumen los agricultores por los problemas en el abastecimiento de agua en los predios, estos no han sido asumidos por la generadora a la fecha.
- 6.3 La abundante evidencia científica que respalda una seria afectación del ecosistema fluvial del río Biobío producto del hydropeaking, evidencia la necesidad de realizar estudios económicos que valoricen los efectos ecosistémicos de este fenómeno a fin de evaluar compensaciones ambientales tendientes a disminuir los efectos negativos de este modelo de operación.
- 6.4 Debido a que especies endémicas de peces presentes en la cuenca no se han adaptado a las variaciones continuas de caudal, es recomendable realizar ajustes la operación de las centrales para evitar su extirpación y la introducción de especies exóticas.
- 6.5 La afectación económica que sufren las organizaciones de regantes y los agricultores producto del hydropeaking ocasionado por la central hidroeléctrica Pangué es un 20% superior al costo por pérdidas de energía y potencia que podría tener la empresa generadora, si adoptara las medidas propuestas para la regulación sobre los caudales.
- 6.6 El beneficio de implementar las medidas propuestas supone un Beneficio para la empresa hidroeléctrica de €891.707 al año, con una relación B/C de 1,2535

- 6.7 Con relación a disminuir los efectos de hydropeaking, las medidas que resultan más factibles de aplicar apuntan a una moderación de las tasas de ascenso y descenso de los caudales durante la operación de la central hidroeléctrica, como también la mantención de un caudal mínimo de evacuación.
- 6.8 La implementación de un sistema de información de acceso libre que permita conocer los caudales y niveles fluviométricos en puntos de interés contribuirá a disminuir la conflictividad en la cuenca.
- 6.9 Una valorización económica de los efectos del hydropeaking sobre el ecosistema fluvial del Biobío, aumentará los actuales costes del actual sistema de generación, haciendo más rentable generar energía hidroeléctrica sin imponer sobrecostes a los agricultores y afectar el ecosistema.
- 6.10 Resulta oportuno, especialmente para la empresa hidroeléctrica, formalizar acuerdos de operación del embalse con el fin de optimizar el usos del agua y atenuar efectos del hydropeaking, en lugar de esperar restricciones legales a la operación.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Aguilera Díaz, Anailys. (2017). El costo-beneficio como herramienta de decisión en la inversión en actividades científicas. *Cofin Habana*, 11(2), 322-343. Recuperado en 12 de enero de 2021, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2073-60612017000200022&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2073-60612017000200022&lng=es&tlng=es).

Bejarano, María D., Garcia-Palacios Jaime H., Sordo-Ward Alvaro, Alonso Carlos, Nilsson Christer (2017). Herramientas para la cuantificación del impacto hidrológico y ecológico de la producción hidroeléctrica. Ponencia en V Jornadas de Ingeniería del Agua. Entornos fluviales y aguas de transición: impactos de los medios urbanos, La Coruña.

Boye, Henry and De Vivo, Michael (2016). The environmental and social acceptability of dams. *Field Actions Science Reports* (online), Special Issue 14/2016, online since April 2016, connection on 30 April 2019.

Calcagno, Alberto T. (2007) Planeamiento y gestión de presas y embalses en un marco de sostenibilidad Ambiental. Instituto Argentino de Recursos Hídricos. *Revista Aqua-LAC-Año1-Nº1*.

De Boer, J.A., Thoms, M.C., Casper, A. F., DeLong, M.D. (2019) The response off ish diversity in a highly modified large river system to multiple anthropogenic stressors. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124.

Elgueta, A., Thoms, M.C., Gorski, K., Diaz, G., Habit, E. M. (2019). Funcional process zones and their fish communities in temperate Andean river networks. *River Res Applic* 2019;1-10.

García, A., Jorde, K., Habit, E., Caamaño, D., Parra, O. (2011). Downstream environmental effects of dam operations: Changes in habitat quality for native fish species. *River Res Applic*, 27: 312-327 (2011)

Global Water Partnership., International Network of Basin Organizations. (2009). *Manual para la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas*

Habit, E., Belk, M. C., Tuckfield, C., Parra O., (2006). Response of the fish community to human-induced changes in the Biobio river in Chile. *Freshwater Biolog* (2006) 51, 1-11

Habit, E., García, A., Diaz, G., Arriagada, P., Link, O., Parra, O., Thoms, M. (2018). River science and management issues in Chile: Hydropower development and native fish communities. *River Res Applic*. 2019;35: 489-499.

Jasper, Frank. (2014). *Towards integrated water resources management*. United Nations Environment programme. UNESCO

León, A., (2008) *Diseño de un Sistema de Gestión Integral para la calidad de Aguas en la Cuenca del Río Maule*. Plan Piloto Sector Maule Norte. Universidad de Chile. Proyecto financiado por CORFO.

Meier, C. Lopez, R. (2015). Ministerio de Energía, Chile., Instituto de investigaciones tecnológicas, Universidad de Concepción. Análisis de medidas de mitigación para los efectos de las variaciones intradiarias de caudal, producto de la generación de punta. Publicación División de Desarrollo Sustentable, Subsecretaría de Energía, Ministerio de Energía, 2015.

OECD. (2017) Multi-purpose water infrastructure. Recommendations to maximise economic benefits.

Sapag, N., Sapag, R. (1995) Preparación y evaluación de proyectos

Vaikasas Saulius, Palaima Kestutis., Pliuraite Virginija. (2013) Influence of hydropower dams on the state of macroinvertebrates assemblages in the Virvyte river, Lithuania. Journal of environmental engineering and landscape management. 2013 Volume 21(4): 305-315.

Wang, J., Ding, L., Tao, J., Ding, C., He, D. (2019). The effects of dams on macroinvertebrates: Global trends and insights. River Res Applic. 2019;1-12