

CÁLCULO DE CAUDAL AMBIENTAL EN EL RÍO ÑUBLE CONSIDERANDO COMPONENTES ECOLÓGICAS Y ANTRÓPICAS

S, TOLEDO ⁽¹⁾, E, MUÑOZ⁽¹⁾⁽²⁾ y C.SOBENES⁽²⁾⁽³⁾

RESUMEN

El desarrollo hidro-energético genera modificaciones a los patrones hidrológicos en ríos, provocando alteraciones a los ecosistemas acuáticos y al desarrollo de actividades antrópicas asociadas al río. Lo que hace necesario mantener un caudal que asegure estabilidad en los cauces intervenidos por proyectos hidroeléctricos. El caudal ecológico asegura un 20% del caudal medio anual, sólo considerando parámetros hidrológicos, sin embargo el caudal ambiental debe considerar parámetros ecológicos, morfológicos, antrópicos entre otros.

En este estudio se calculó el caudal ambiental para el tramo del río Ñuble, que se podría ver afectado por la construcción de un proyecto hidroeléctrico en las cercanías de la zona urbana de San Fabián de Alico. Para realizar el cálculo se consideraron las componentes ecológicas, hidrológicas y antrópicas. La componente ecológica se centró en la fauna íctica presente en el tramo de estudio, la cual fue modelada con el software Computer Aided Simulation System for Instream Flow Requirements (CASIMIR). Por otro lado la componente antrópica se analizó con información entregada por el medio humano con respecto a actividades realizadas en torno al río como son el rafting y el kayak.

Para el cálculo del régimen de caudal ambiental se consideró la “Guía metodológica para el cálculo de caudal ambiental para centrales hidroeléctricas en el SEIA” (2016), que indica caracterizaciones y parámetros que deben cumplirse con el régimen de caudal calculado.

El régimen de caudal ambiental calculado, permite la mantención y desarrollo de la fauna íctica hallada en el tramo de estudio, además del desarrollo de actividades antrópicas en los meses en que dichas actividades se realizan de manera comercial.

PALABRAS CLAVE: modelación hidrobiológica, caracterización ecológica, caudal ambiental.

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de La Santísima Concepción, Chile, stoledo@ing.ucsc.cl

⁽²⁾ Centro de Investigación en Biodiversidad y Ambientes Sustentables (CIBAS), Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, emunozo@ucsc.cl

⁽³⁾ Departamento de Medio Ambiente y Energía, csobenes@ucsc.cl



ABSTRACT

The hydro-energetic development generates modifications to the hydrological patterns in rivers, causing alterations to the aquatic ecosystems and the development of anthropic activities associated to the river. For this reason it is necessary to maintain a flow that ensures stability in the channels operated by hydroelectric projects. The ecological flow assures 20% of the average annual flow, only considering hydrological parameters, however the environmental flow considers ecological, morphological, anthropic parameters among others.

This study calculates the environmental flow for the section of the Ñuble river, which could be affected by the construction of a hydroelectric project in the vicinity of the urban area of San Fabián de Alico. Ecological, hydrological and anthropogenic components are considered for the calculation. The ecological component focuses on the fauna present in the study section, which is modeled with the Computer Aided Simulation System for Instream Flow Requirements (CASIMIR), which, through the Habitat Suitability Index (HSI), delivers optimal flows for the development of fish species. On the other hand the anthropic component is analyzed with information given by the human environment with respect to activities carried out around the river such as rafting and kayaking.

For the calculation of the environmental flow rate, the "Methodological Guide for the Calculation of Environmental Flow for Hydroelectric Power Plants in SEIA" (2016) is considered, which indicates characterizations and parameters to be fulfilled with the calculated flow rate.

The calculated environmental flow rate allows for the maintenance and development of the fish fauna found in the study section, in addition to the development of anthropic activities in the months in which these activities are carried out commercially.

KEY WORDS: Hydrobiological modeling, ecological characterization, environmental flow



1. INTRODUCCIÓN

La modificación de los patrones hidrológicos en ríos a causa del funcionamiento de hidroeléctricas o embalses provoca cambios estructurales y funcionales en los ecosistemas acuáticos. Producto de ello surge la necesidad de mantener un caudal que asegure la estabilidad de dichos sistemas post alteración. El concepto de caudal ecológico, definido como el 20% del caudal medio anual (MMA, 2012), busca proteger los valores ecológicos de los ríos, como la flora y fauna. Sin embargo, en muchos casos, el caudal ecológico corresponde sólo al caudal mínimo que puede mantenerse en un cauce para asegurar la permanencia de estos valores (Jamett & Rodrigues, 2015).

El desarrollo hidro-energético debe ir ligado a regímenes de caudales que permitan la mantención de recursos ecológicos. Diez & Olmeda (2008) sugieren que es posible compatibilizar el aprovechamiento de caudales fluviales para generación hidroeléctrica, manteniendo un estado ecológico global aceptable, mediante el cálculo de caudal ecológico. Sin embargo, no se hace referencia a la mantención de actividades antrópicas que dependan de los cauces a intervenir, lo que cobra importancia debido a que la alteración de magnitud y frecuencia de los caudales provocada por el aprovechamiento del recurso, genera alteraciones en el sustrato del lecho del cauce (Reiser et al., 1989), afectando los meso-hábitats existentes y modificando la morfología (Bogan, 1993). En aquellos ríos donde existe un uso antrópico, estas alteraciones generan un impacto directo sobre dichas actividades, cambiando los patrones ecológico-ambientales, los patrones de actividades en torno al río.

En Chile operan más de 100 hidroeléctricas de diferentes características que abastecen al Sistema Interconectado Central (SIC), las que se concentran en zonas de cuencas exorreicas. Existen desde minicentrales con una producción menor a 0.5 MW, a grandes represas que generan hasta 690 MW. La región del Biobío presenta la mayor capacidad de producción energética del país, con 56 proyectos que pueden aportar un total de 4753 MW al SIC (MinEnergía, 2015). La creación de centrales y minicentrales hidroeléctricas hace prever que se alcanzará un 70% de producción de energía renovable al año 2025 (MinEnergía, 2016).

San Fabián de Alico es una comuna turística pre-cordillerana ubicada junto al río Ñuble. En sus cercanías existen 2 proyectos hidroeléctricos actualmente en ejecución, Hidroñuble y Embalse Punilla. Estos proyectos a futuro generarán una laminación de caudales del río Ñuble en los tramos de influencia asociados a cada proyecto, alterando componentes ecológicas y antrópicas, como la práctica de actividades que históricamente se han desarrollado en torno al río como rafting, kayak, pesca deportiva, camping, etc. Adicionalmente existen derechos de agua no consuntivos otorgados para un tercer proyecto, el cual se emplazaría en un punto cercano a la zona urbana de San Fabián de Alico (Comité Ambiental Municipal, 2015) (Figura 1), lo que podría afectar las actividades de uso antrópico que se desarrollan en el río y en la comuna, con un potencial impacto sobre el turismo.

El Servicio de Estudio Ambiental (SEA, 2016) define el caudal ambiental como aquel caudal que permite la mantención de los medios de subsistencia y bienestar de las personas que dependen del ecosistema, a diferencia del caudal ecológico el cual sólo considera parámetros hidrológicos, como el 20% del caudal medio anual. El presente estudio busca definir el caudal ambiental para el tramo del río Ñuble (Figura 1), incluyendo las actividades antrópicas que tradicionalmente se han desarrollado en el río. Con ello, se busca cuantificar tanto los caudales necesarios para evitar impactos sobre la flora y fauna, como sobre las actividades antrópicas existentes en torno a este. Para llevar a cabo el análisis se calculó el caudal ambiental considerando las componentes hidrológica, ecológica y de usos antrópicos, con énfasis en las actividades asociadas al turismo como son el rafting y kayak.

El presente estudio, tiene como objetivo principal el cálculo de régimen de caudal ambiental para el tramo estudiado del río Ñuble, para ello se realizó una caracterización de las especies de fauna íctica encontradas en los estudios de impacto ambiental desarrollados para las cercanías del tramo de estudio (Proyecto embalse punilla, 2004 y Proyecto Hidroñuble 2006). Se realizó una modelación hidrobiológica para cada una de estas. Dicha modelación se realizó mediante el software Computer Aided Simulation System for Instream Flow Requirements (CASIMIR), el cual opera con curvas de preferencias o reglas difusas asociadas a cada especie íctica y cuyo hábitat se requiera modelar. Se utilizaron datos de peces obtenidos de proyectos desarrollados en cuencas cercanas (EULA, 2000), y estudios asociados a la fauna íctica presente en el tramo de estudio (García et al., 2011). Los datos utilizados para caracterizar el uso antrópico del tramo de estudio del río

Ñuble se obtuvieron de la consulta a empresas que realizan estas actividades (“Extremo Sur Expediciones y Pacífico Andino” ofrecen servicios de rafting y kayak).

1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de influencia corresponde al tramo del río Ñuble comprendido entre los puntos 1 y 2 (Figura 1) con una longitud de aproximadamente 9 km. En dicho tramo se observan diferentes meso-hábitats, siendo más comunes los meso-hábitats de pozón-rápido, en donde los pozones se caracterizan por poseer gran profundidad y velocidad baja, y los rápidos poca profundidad y alta velocidad. El régimen hidrológico del río es del tipo nivo-pluvial con un caudal medio anual para el tramo de 101 m³/s. Los mayores caudales se concentran entre mayo y noviembre, producto de un aumento de precipitaciones y posterior derretimiento de nieve (Mendoza, 2015)

Para el cálculo del caudal ambiental y posterior análisis se consideró un tramo de 2 km aproximadamente (puntos A y B, Figura 1) dentro del tramo de influencia. Sobre este tramo se realizó una caracterización morfológica (topográfica) y del sustrato. Dicho tramo se consideró representativo del tramo de influencia, puesto que contiene los meso-hábitats que caracterizan todo el tramo de influencia del proyecto.

En el tramo de estudio, además de las actividades anteriormente nombradas, se realiza pesca deportiva, la cual no se consideró en este estudio, debido a que no se encuentra regulada y se practica durante todo el año dependiendo de la especie a capturar.

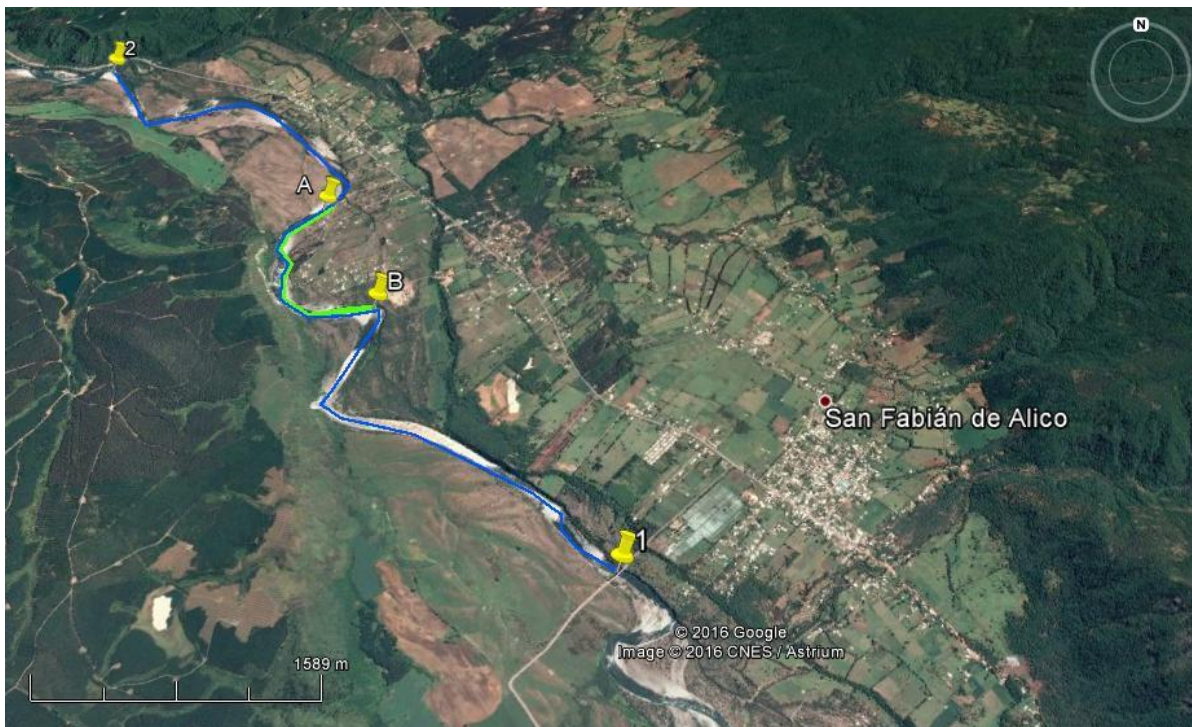


Figura 1: Tramo de influencia del proyecto en etapa de prefactibilidad, comprendido entre puntos 1 y 2. Tramo de estudio representativo del proyecto, comprendido entre puntos A y B.

SEA (2016) indica que es necesario realizar una caracterización, morfológica, ecológica, hidrológica, físico-química, de zonas ribereñas, y de usos antrópicos, en el tramo de influencia de un proyecto. Dado que en este estudio sólo se consideraron componentes ecológicas y antrópicas, se descartó realizar las caracterizaciones físico-químicas y de zonas ribereñas.

1.1 Caracterización ecológica

La caracterización ecológica corresponde al estudio de comunidades y poblaciones de la biota en el ecosistema fluvial. Para desarrollar dicha caracterización se debe conocer la taxonomía, riqueza, abundancia, estructura de tallas y épocas y sitios de reproducción de especies juveniles y adultas de la fauna íctica presente en el tramo de estudio. En el marco del presente estudio, no se incluyó información sobre la vegetación y la fauna bentónica y terrestre debido a la inexistencia de información base necesaria para llevar a cabo estos análisis.

Las especies estudiadas en la caracterización ecológica se obtuvieron de estudios realizados para los proyectos Embalse Punilla (CADE-IDEPE, 2004) cuyos muestreos se realizaron entre los años 200 y 2002, e Hidroñuble (Illanes & Asociados, 2006) cuyos muestreos se realizaron en el año 2006. Para estos proyectos se realizaron 4 y 1 campañas de muestreo respectivamente. En total se encontraron 7 especies ícticas nativas (*Diplomystes nahuelbutaensis*, *Trichomyxterus chiltoni*, *Trichomyxterus aerolatus*, *Percilia irwini*, *Percichthys trucha*, *Bullockia maldonadoi* y *Odontesthes Mauleanum*) y 2 especies introducidas (*Oncorhynchus mykiss* y *Salmo trutta*). De las especies introducidas, sólo se consideró en este estudio a la especie *O. mykiss*, dado que la *S. trutta* sólo fue hallada en 3 de los 7 puntos de muestreo del proyecto Embalse Punilla.

De acuerdo a lo indicado en los estudios de impacto ambiental de los proyectos Embalse Punilla (2004) e Hidroñuble (2006), de las especies halladas 4 (*P. irwini*, *P. trucha*, *O. mauleanum* y *T. aerolatus*) se encuentran en estado de conservación vulnerable, mientras que 3 (*D. nahuelbutaensis*, *B. maldonadoi* y *T. chiltoni*) están en peligro de extinción.

Respecto a las tallas promedio sólo se tiene información del muestreo realizado para el proyecto Embalse Punilla, en el que se obtuvieron los siguientes datos: *O. mykiss*: 7.5 cm, *D. nahuelbutaensis*: 4 cm, *T. chiltoni*: 4 cm, *T. aerolatus*: 5 cm, *P. irwini*: 4 cm, *P. trucha*: 12-22 cm (CADE-IEPE, 2004)

1.2 Caracterización hidrológica

Según SEA (2016), para desarrollar una completa caracterización hidrológica se debe caracterizar el tipo de régimen del río, identificar la magnitud de crecidas ordinarias y conocer la periodicidad de fenómenos climatológicos.

Para llevar a cabo lo anterior, se construyó una curva de variación estacional (Figura 2). De esta se observa que el río tiene un régimen nivo-pluvial, con un aumento de los caudales entre abril y junio, producto del aumento de precipitaciones. Posteriormente, entre julio y agosto se observa una leve disminución de caudales y luego un aumento de estos. Esto último asociado al efecto del derretimiento de nieve de la parte alta de la cuenca del río Ñuble entre septiembre y octubre.

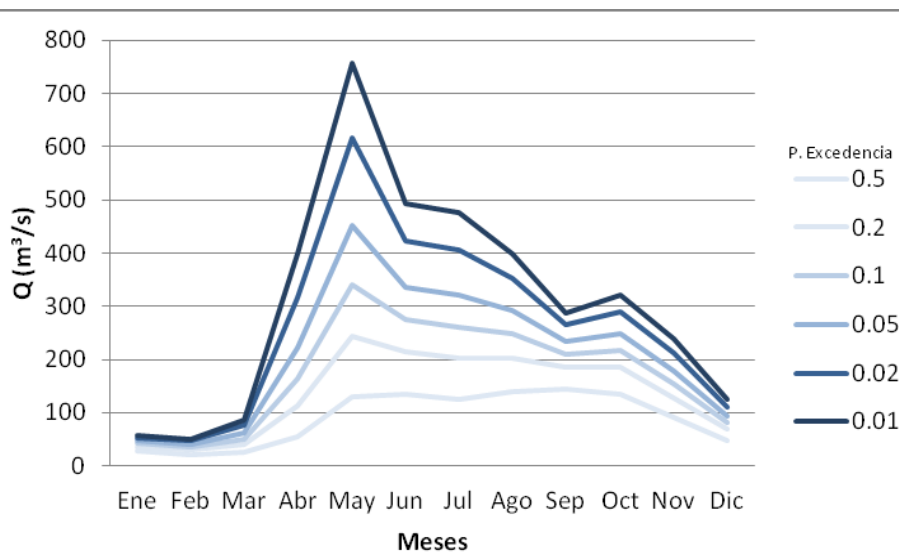


Figura 2: Curva de variación estacional asociada al tramo de estudio. Se observa el régimen nivo-pluvial, y el mayor aumento de caudales entre abril y junio

Dado que las crecidas ordinarias corresponden a crecidas pequeñas con periodos de retorno entre 1 y 6 años (SEA, 2016), se realizó un análisis estadístico de los caudales máximos instantáneos, para dichos periodos de retorno, los que indicaron como resultado caudales de 912 y 1797 m³/s respectivamente.

Para obtener la periodicidad y frecuencia de fenómenos climatológicos, como el cambio de estaciones o aumento de precipitaciones, se utilizó la transformada de wavelets sobre registros mensuales de caudales, precipitaciones y temperatura cercanos a la zona de estudio.

Debido a que las estaciones de la DGA, cercanas a la zona de estudio, no cuentan con registros pluviométricos y de temperatura, se utilizó una base de datos global publicada por Willmott & Matsuura (2012). Esta base de datos contiene registros mensuales de temperaturas y precipitaciones para un periodo superior a 100 años. Para caracterizar las temperaturas y precipitaciones sobre la cuenca se realizó una ponderación por áreas, según el aporte relativo que tienen dentro del área de estudio. En la Figura 3.a se observa el resultado obtenido para las temperaturas, en donde se aprecia un aumento de temperaturas con frecuencia de 12 meses, lo que coincide con la llegada de estaciones cálidas. Lo mismo se observa en la Figura 3.b, asociada a las precipitaciones mensuales, donde se indica una periodicidad de 12 meses, asociada a la llegada de estaciones frías y lluviosas. Con respecto a la periodicidad del aumento de caudales, en la Figura 3.c se observa que estos presentan un aumento cada 6 meses aproximadamente, lo que coincide con los resultados obtenidos en la curva de variación estacional, que indicó un régimen nivo-pluvial.

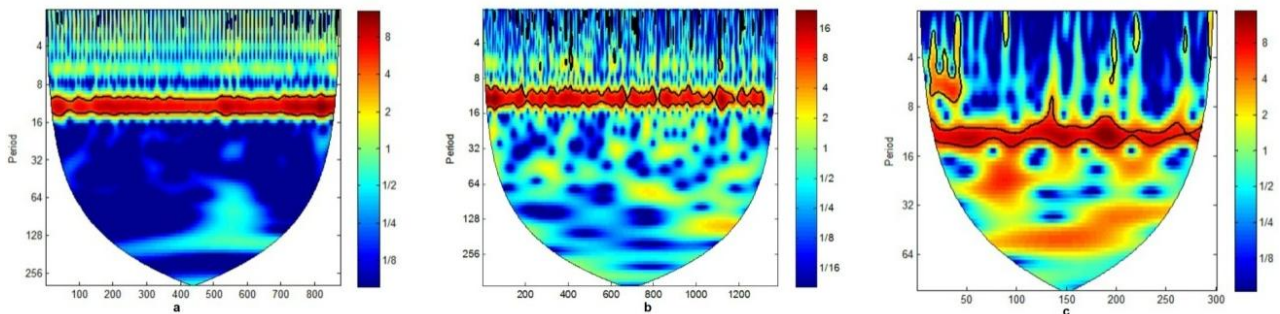


Figura 1. a) Frecuencia de temperatura para un periodo de 100 años en el área de estudio. b) Frecuencia de precipitaciones para un periodo de 100 años en el área de estudio. c) Frecuencia de caudales para un periodo de 100 años en el área de estudio.

Adicionalmente, para realizar la caracterización hidrológica, se utilizaron datos de las estaciones “Río Ñuble en San Fabián” y “Río Ñuble en San Fabián 2” controladas por la Dirección General de Aguas. Dado que cada estación por sí sola no cuenta con la longitud de registros requeridos por el SEA (25 años) para realizar una caracterización hidrológica, se realizó una transposición de caudales por áreas portantes para trasladar los registros correspondientes al área de estudio. Se consideraron 26 años de datos, desde 1989 hasta 2015.

1.3 Caracterización antrópica

La caracterización de los usos antrópicos se requiere para evaluar si existen actividades relevantes en el área de influencia (AI) y que deban incluirse en el cálculo de régimen de caudal ambiental. En este estudio, se consideraron únicamente actividades in situ, de uso sin contacto directo, es decir, aquellas que se desarrollan en el río o en su ribera y en las que el ser humano no toma contacto directo con el agua, pero que son condicionadas por las características hidrológicas del río (SEA, 2016).

Para caracterizar los usos antrópicos, se consideraron el rafting y el kayak, dado que son actividades que pueden verse perjudicadas producto de una intervención en el río.

El SEA (2016) indica que la información para caracterizar las actividades in situ debe ser recopilada mediante la descripción del AI del medio humano. Para ello se contactaron las empresas de turismo “Pacífico Andino” y “Extremo Sur Expediciones”, ambas ubicadas en San Fabián de Alico. Dichas empresas realizan actividades de rafting y kayak. Los guías de estas actividades proporcionaron información cualitativa y cuantitativa (caudales y características del río para el desarrollo de estas actividades) para realizar la caracterización de usos antrópicos y el posterior análisis del caudal ambiental.

De acuerdo a lo informado, el rafting y kayak tienen una temporalidad de desarrollo comercial entre los meses de noviembre y febrero, sin embargo guías profesionales y personas expertas pueden realizar bajadas durante otoño e invierno. Los requerimientos hidráulicos para desarrollar estas actividades, se indican en la Tabla 1 la que muestra los parámetros de mayor y menos idoneidad para la realización de rafting y kayak.

Tabla 1: Requerimientos hidráulicos para el desarrollo de rafting y kayak.

	Caudal (m ³ /s)	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)
Más idóneo	80-160	0.5- 1.5	1
Menos idóneo	<80 y >160	<0.5 y >2	>5

2. METODOLOGÍA

En el presente estudio se calculó el caudal ambiental en el río Ñuble para el tramo de estudio indicado en la Figura 1. Para desarrollar el cálculo de caudal ambiental se consideraron actividades antrópicas asociadas al río como rafting y kayak, además de componentes ecológicas asociadas únicamente a la fauna íctica presente en el tramo de estudio.

Para analizar las componentes biológicas (peces) se construyó un modelo hidráulico y un modelo hidrobiológico. El modelo hidráulico permitió obtener parámetros hidráulicos a lo largo del río, asociados a diferentes caudales, mientras que el modelo hidrobiológico cruza dicha información, con las características y necesidades o preferencias de hábitat de las especies de peces observadas en las cecanías de la zona de estudio.

2.1 Modelo hidráulico

Para construir el modelo hidráulico se realizó un levantamiento aerofotogramétrico en la época de estiaje del río. Mediante este levantamiento se obtuvo la topografía del cauce, a partir de la cual se generaron perfiles transversales distanciados cada 10 m aproximadamente. Luego, cada perfil transversal fue exportado al software HEC-RAS para la caracterización morfométrica del río y posterior elaboración del modelo hidráulico.

Sobre cada perfil transversal se realizó un filtrado de puntos para reducir la cantidad de información en el modelo, luego se realizaron simulaciones y se calculó el eje hidráulico para caudales de 0.5, 1, 10, 20.2, 50, 80, 100, 101.1, 150 y 300 m³/s. Los caudales entre 80 y 300 m³/s representan las condiciones en que mejor se desarrollan las actividades antrópicas, mientras que caudales menores a estos dificultan su desarrollo. Por las características del río, se asumió como condición de borde una profundidad crítica en los extremos de aguas arriba y aguas abajo del tramo modelado. Adicionalmente, el modelo se ejecutó en régimen mixto para simular los meso-hábitats de pozón y rápido. Como resultado se obtuvo la profundidad de flujo, la elevación de superficie de agua y velocidad media para cada perfil transversal asociada a cada caudal de la modelación.

2.2 Modelo hidrobiológico

El modelo hidrobiológico combina componentes ecológicas e hidráulicas que permiten describir la forma en que un organismo selecciona un microhábitat de acuerdo al índice de idoneidad de hábitat (HSI). Este índice representa el hábitat que reúne un conjunto de condiciones en que mejor se desarrolla una especie, y varía entre 0 y 1, donde 0 es lo menos óptimo (i.e. no existe hábitat adecuado para la especie en análisis) y 1 lo más óptimo (i.e. el 100% de la superficie mojada es adecuada para la especie en análisis).

Para desarrollar el modelo hidrobiológico se caracterizó la morfología del tramo de estudio en el software CASIMIR mediante una planilla de coordenadas globales para cada perfil transversal. A su vez se elaboró una planilla con los datos de altura de superficie de agua para los perfiles transversales. Adicionalmente se caracterizó el sustrato para cada perfil transversal con valores entre 6 y 9 para tramos con características de rápidos y valores entre 2 y 5 para tramos con características de pozón. Dichos valores fueron obtenidos del "Manual para modelos de simulación de hábitat" (Schneider et al., 2010) del software CASIMIR (Tabla 2).

**Tabla 2:** Tipos de sustrato utilizados en modelación hidrobiológica según software CASIMIR

Tipo de sustrato	Índice
Material orgánico, detritos	0
Limo- arcilla	1
Arena <2mm	2
Grava fina 2-6 mm	3
Grava media 6-20mm	4
Grava grande	5
Piedras pequeñas	6
Piedras grandes	7
Rocas >20 cm	8
Rocas	9

Para caracterizar los requerimientos o preferencia de hábitat de las especies ícticas *T. chiltoni*, *T. aerolatus*, y *O. mykiss* se utilizaron curvas de preferencia (EULA, 2000) mientras que las especies *P. irwini*, *P. trucha*, *B. maldonadoi* y *O. mauleanum* se caracterizaron mediante reglas difusas (García et al, 2011). Las curvas de preferencias son curvas cuyo eje horizontal indica los valores de parámetros de profundidad, velocidad o sustrato, y cuyo eje vertical indica con valores entre 0 y 1 la idoneidad que presenta una especie para diferentes valores de dichos parámetros. Las reglas difusas por otra parte, evalúan cuantitativamente expresiones de juicio de expertos (biólogos) de la forma “SI i) velocidad es media y ii) profundidad es media y iii) sustrato es grande, entonces el hábitat es muy bueno para una especie determinada” (Aquaflow, 2015).

El modelo desarrollado en el software CASIMIR determinó para cada especie el HSI, en forma de gráfico. Este índice indica el caudal en que mejor se desarrolla una especie, en sus diferentes estadios. De los gráficos se pudo obtener el caudal asociado al mayor HSI y el caudal asociado al 0.25HSI, el cual fue utilizado en el cálculo de caudal ambiental, siguiendo el criterio definido por Jowett (1996) en donde se define que para asegurar la mantención de especies se debe mantener como mínimo un HSI de 0.25.

3. CÁLCULO DEL RÉGIMEN DE CAUDAL AMBIENTAL

Según SEA (2016), el régimen del caudal ambiental debe contener aspectos hidrológicos, hidrobiológicos y de usos antrópicos.

De acuerdo al Decreto 14 del Ministerio de Medio Ambiente (2012) el caudal ecológico según método hidrológico, corresponde al 20% del caudal medio mensual, con límite máximo en el 20% del caudal medio anual, utilizando la estadística hidrológica de los últimos 25 años.

La Tabla 3 muestra los caudales medios mensuales obtenidos para el tramo de estudio, y los caudales calculado según MMA (2012).

Tabla 3: Caudales medios mensuales (QMM) y caudales medios anuales (QMA). Q ECOI corresponde al caudal ecológico.

Caudal (m ³ /s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
QMM	31	24	28	65	158	158	155	153	152	144	99	53
20% QMM	6	5	6	13	32	32	31	31	30	29	20	11
20% QMA	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Q. ECOL	6	5	6	13	20	20	20	20	20	20	20	11

Utilizando el software de modelación de hábitat CASIMIR se calcularon los índices de idoneidad de hábitat para cada especie. Utilizando el criterio de Jowett (1997) mencionado anteriormente, se obtuvieron los resultados indicados en la Tabla 4, para cada especie en estadio adulto y juvenil.

Tabla 4: Caudales mínimos obtenidos para asegurar la subsistencia de cada especie, utilizando el criterio de 0.25HSI (Jowett, 1997)

Especie/mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<i>Percilia gillisi</i> adulto								8	8	8	8	
<i>P. gillisi</i> juvenil	4	4	4	4	4	4	4					4
<i>Bullockia. maldonadoi</i> adulto	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
<i>B. maldonadoi</i> juvenil	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
<i>Percichthys trucha</i> adulto						3	3	3				
<i>P. trucha</i> juvenil	3	3	3	3	3				3	3	3	3
<i>Odontesthes mauleanum</i> adulto							2	2	2	2	2	2
<i>O. mauleanum</i> juvenil	3	3	3	3	3	3						
<i>Diplomystes nahuelbutaensis</i> adulto			50	50								
<i>D. nahuelbutaensis</i> juvenil	20	20			20	20	20	20	20	20	20	20
<i>Trichomycterus aerolatus</i> adulto									20	20	20	20
<i>Oncorhynchus mykiss</i> adulto								25	25	25	25	
<i>O. mykiss</i> juvenil	7	7	7	7	7	7	7					7
Qeco hidrobiológico (m³/s)	20	20	50	50	20	20	20	25	25	25	25	20

Considerando que el caudal ecológico debe satisfacer los requerimientos de todas las especies, se determinó el caudal ecológico-hidrobiológico como el mayor caudal de cada mes.

De acuerdo a lo consultado a “Extremo Sur Expediciones “ y “Pacífico Andino”, kayak y rafting se desarrollan de manera comercial entre los meses de noviembre y febrero, con un caudal ideal de 80 m³/s. Los parámetros de velocidad y profundidad asociados a dichas actividades (Tabla 1) se ingresaron al software CASIMIR, y a partir de este se obtuvo el HSI asociado a diferentes caudales. La Figura 4 muestra los resultados obtenidos.

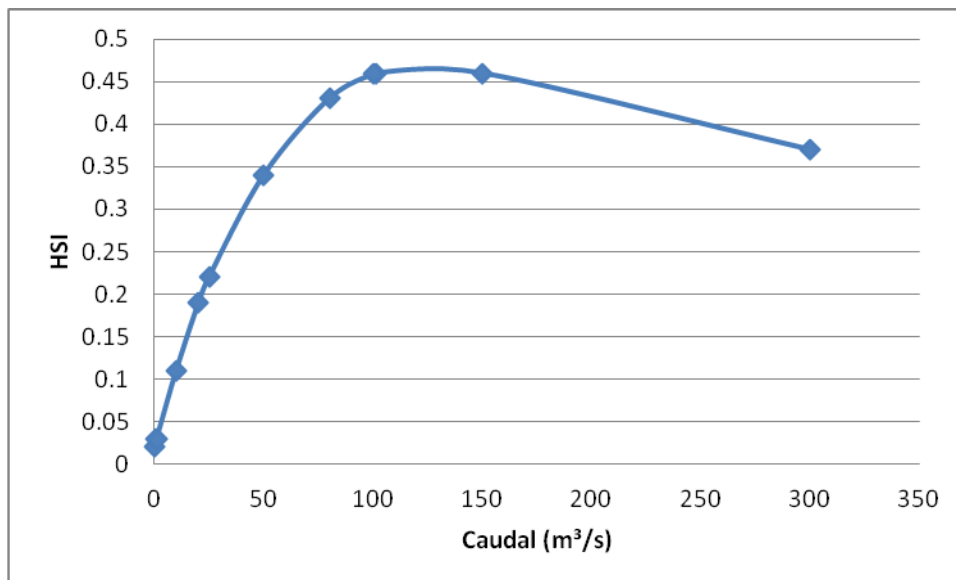


Figura 2: HSI para rafting y kayak considerando los diferentes caudales modelados.

La Figura 4 muestra una estabilización de la pendiente para caudales entre 80 y 160 m³/s . Estos caudales se encuentran dentro del rango adecuado para desarrollar kayak y rafting, sin embargo superan el caudal medio mensual obtenido para el tramo de estudio en los meses de enero y febrero, dado que según los registros de datos para esos meses, el caudal medio mensual máximo que se ha alcanzado en los últimos 25 años corresponde a 53 m³/s.

El caudal ambiental se obtuvo a partir del cruce de los resultados anteriores. La Figura 5 muestra un resumen de los resultados obtenidos y el caudal ambiental incluyendo los usos antrópicos.

Es importante mencionar que caudales inferiores a $50\text{m}^3/\text{s}$, dificultan el desarrollo de actividades antrópicas, debido a la disminución de alturas de agua. Como se indicó en la Tabla 1 profundidades menores a 0.5 m impiden el desarrollo adecuado de rafting y kayak. En la Figura 6 se observan las profundidades obtenidas del modelo elaborado por el software CASIMIR, para un caudal de $20\text{m}^3/\text{s}$, en donde es posible notar que en gran parte del tramo de estudio las profundidades no superan los 0.4m, profundidades con las cuales no es posible desarrollar las actividades antrópicas mencionadas.

Como se observa en la Figura 4, el mayor HSI para el rafting y kayak (0.47 aproximadamente) se obtiene para caudales entre 100 y $150\text{m}^3/\text{s}$, pero dado que estos superan a los caudales medios mensuales registrados en el tramo de estudio se consideró un HSI de 0.35, asociado a un caudal de $50\text{m}^3/\text{s}$. Este caudal cumple con los requisitos hidráulicos de velocidad, y profundidad impuestos por el SEA (2016) para desarrollar dichas actividades.

Adicionalmente, cabe comentar que en el caso de actividades antrópicas sólo se consideraron los meses en que dichas actividades se desarrollan de manera comercial y por turismo, dado que una disminución de caudales en dichos meses es lo que más impactaría a las actividades asociadas al turismo que se desarrollan en comuna de San Fabián de Alico.

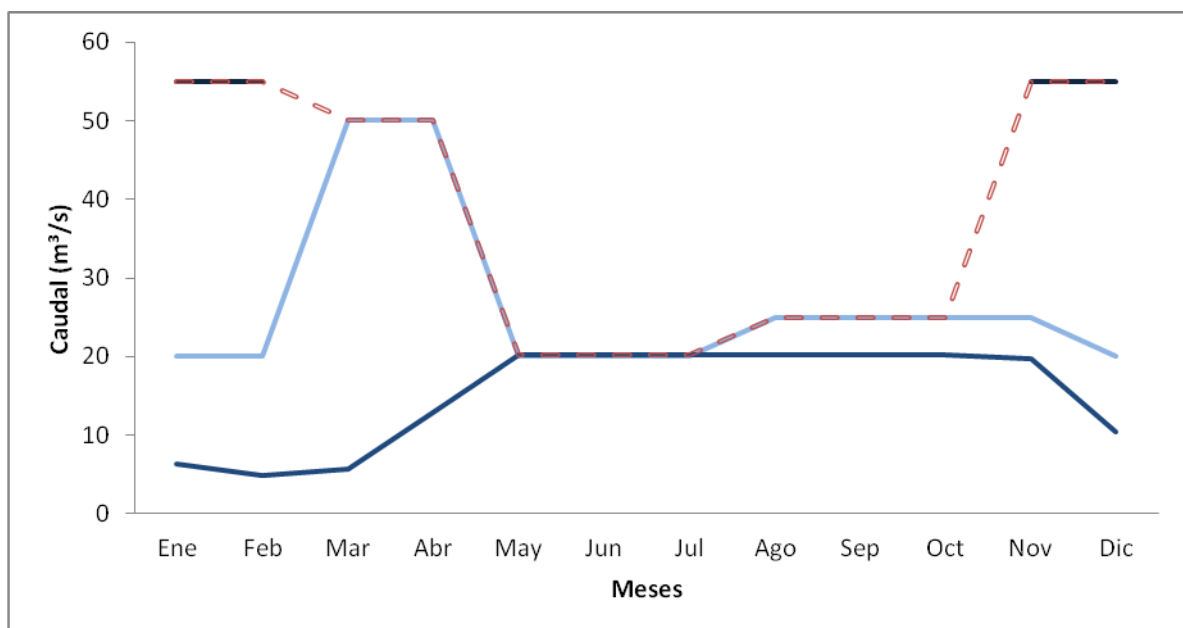


Figura 3: Caudal ambiental, obtenido como la envolvente de los caudales calculados de acuerdo a modelo hidrobiológico, método hidrológico e información del medio humano. La línea segmentada roja indica el caudal ambiental obtenido del cruce de información de caudal ecológico (línea azul), caudal hidrobiológico (línea celeste) y caudal para usos antrópicos (línea azul marino).

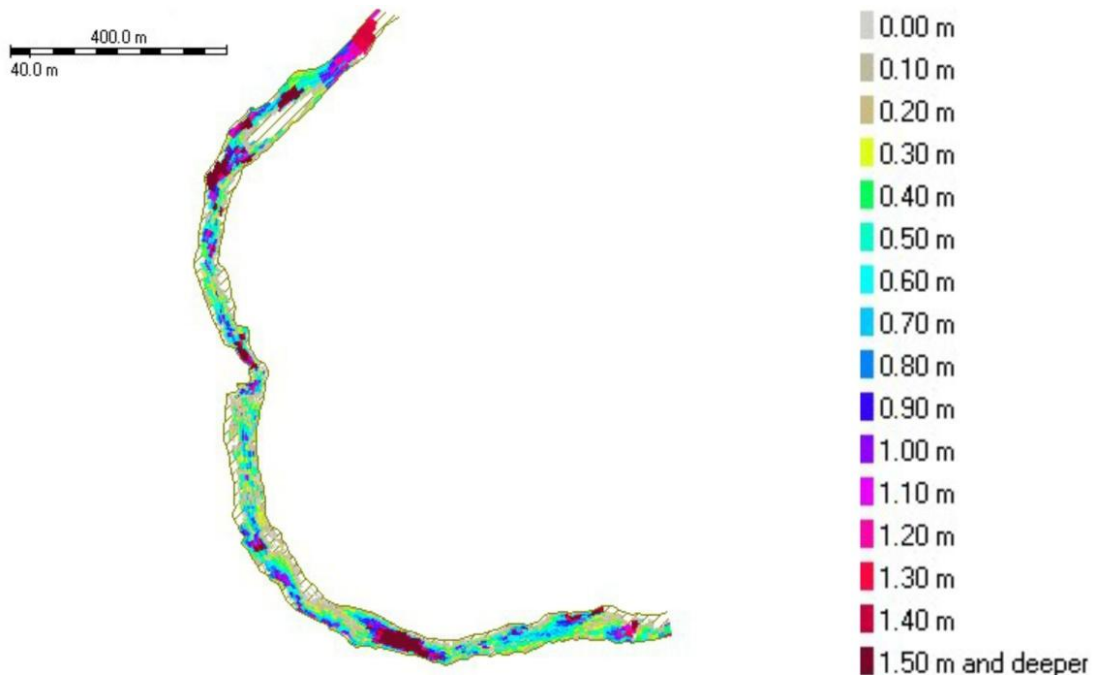


Figura 4: Profundidades en el tramo de estudio para un caudal de 20 m³/s.

El SEA (2016) establece criterios de profundidad mínima y velocidad máxima para llevar a cabo actividades antrópicas como son el rafting y el kayak cuyas profundidades mínimas corresponden a 0.2 y 0.1 m respectivamente, y la velocidad máxima es de 4,5 m/s, para ambas actividades.

La información entregada por el SEA (2016), se comparó con la información obtenida del modelo hidráulico, de donde se obtuvieron valores de profundidad y velocidad media, para todos los caudales modelados. En la Figura 7, se observa que todos los caudales modelados cumplen con una profundidad mayor a la establecida por el SEA (2016), para el desarrollo de rafting y kayak. Sin embargo en el caso de la velocidad máxima, esta es excedida cuando se trata de caudales mayores a 100 m³/s (Figura 8), lo que indica una discrepancia entre lo establecido por el SEA (2016) y la información recopilada por el medio humano. Para cumplir con la normativa establecida en la (Guía metodológica para determinar el caudal ambiental para centrales hidroeléctricas en el SEIA, 2016), los caudales no deben superar los 80 m³/s. Aún bajo estas condiciones es posible llevar a cabo de manera comercial las actividades de rafting y kayak, ya que el HSI adoptado para desarrollar dichas actividades está asociado a un caudal de 50 m³/s.

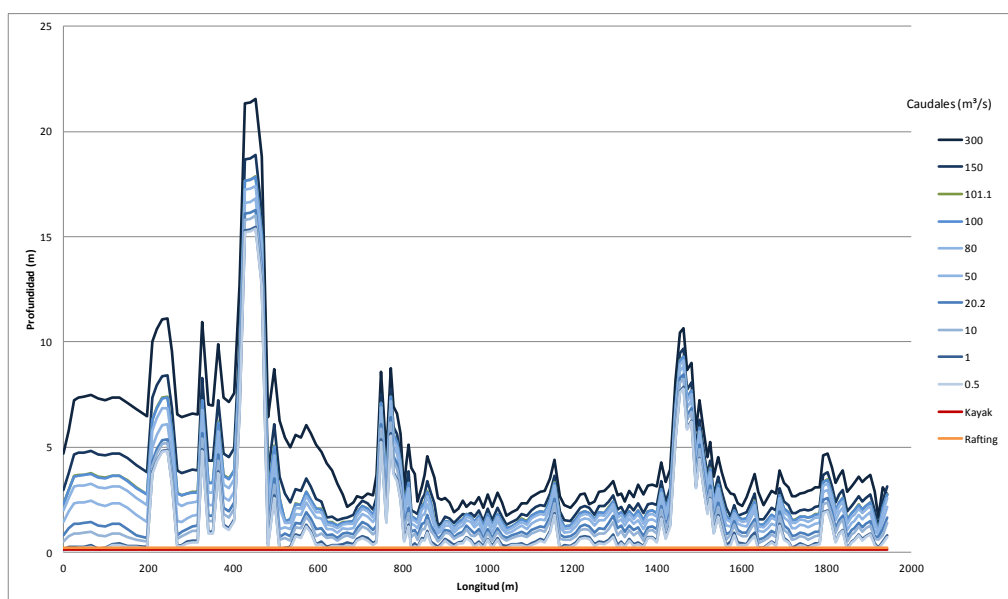


Figura 5: Profundidades asociadas a los caudales modelados, para la longitud del tramo de río estudiado, partiendo desde aguas abajo.

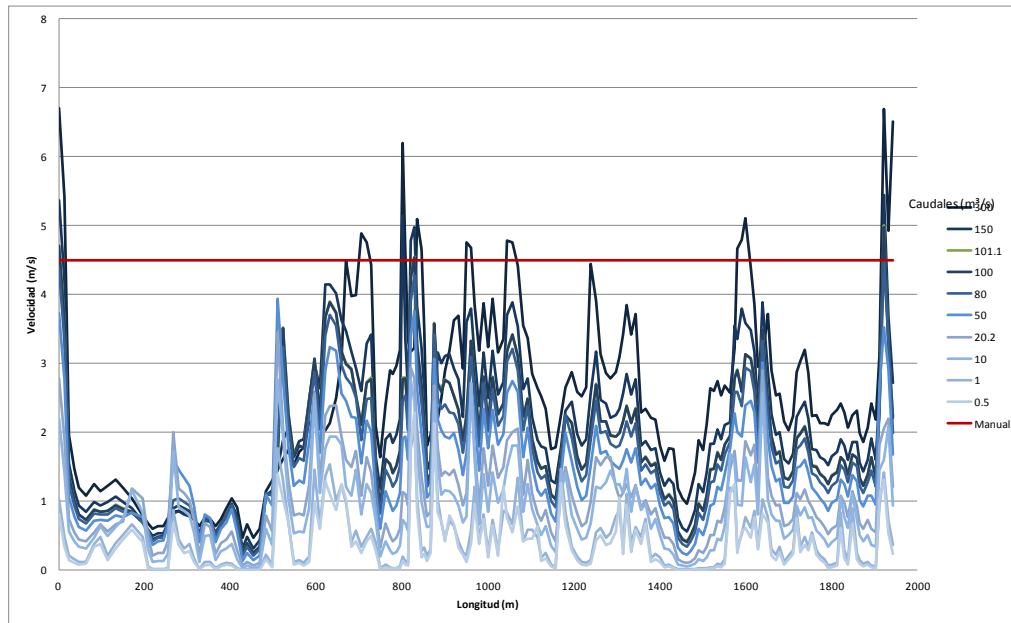


Figura 6: Velocidades asociadas a los caudales modelados, para la longitud del tramo de río estudiado, partiendo desde aguas abajo.

4. RESULTADOS

El caudal ambiental fue considerado como la envolvente de los caudales calculados, mediante el modelo hidrobiológico, el método hidrológico y la información obtenida del medio humano, y se presenta en la Tabla 5. Este caudal asegura la mantención de especies ícticas y la ejecución de manera comercial de actividades como rafting y kayak, además de respetar lo establecido por el Ministerio de Medio Ambiente (2012) en el Decreto 14.

Tabla 5. Régimen de caudal ambiental calculado, considerando parámetros ecológicos, hidrológicos y antrópicos.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Q ambiental (m ³ /s)	55	55	50	50	20	20	20	25	25	25	55	55



5. CONCLUSIONES

El régimen de caudal ambiental calculado en el presente estudio permite asegurar la mantención de especies de fauna íctica, lo que conlleva a mantener las comunidades y poblaciones que conforman los ecosistemas dentro del tramo de estudio (SEA, 2016). A su vez permite la realización de actividades antrópicas como rafting y kayak en los meses en que estas se desarrollan de manera comercial, al cumplir con la normativa impuesta en la “Guía metodológica para determinar el caudal ambiental para centrales hidroeléctricas en el SEIA” (2016) de no superar velocidades máximas, y presentar profundidades mayores a las mínimas establecidas.

El proyecto hidroeléctrico en etapa de prefactibilidad, que se ubicaría en las cercanías de la zona urbana de San Fabián de Alico, provocaría el término de las actividades antrópicas antes mencionadas, dado que al poseer derechos no consuntivos por 39 m³/s y punto de restitución de agua, aguas debajo de donde se desarrollan dichas actividades, generará una disminución de caudal en los meses de desarrollo comercial de rafting y kayak. Sin embargo no afectará mayormente a las especies de fauna íctica halladas en el lugar.

Dado que no existe una regla general para seleccionar el caudal ambiental, queda abierta la posibilidad de determinarlo según lo más conveniente para las empresas con derechos de aguas, pasando por alto la totalidad de factores ecológicos o antrópicos presentes en el río.

6. REFERENCIAS

- Aquaflow (2015).** Informe proyecto "Central hidroeléctrica frontera". Concepción, Chile
- Bogan, A. (1993).** *Freshwater bivalve extinctions (Mollusca: Unionoida): A search for Causes.* Oxford Journal.
- CADE-IDEPE. Consultoría en Ingeniería. (2004).** *Línea de base medio biótico Proyecto "Embalse Punilla".* Gobierno de Chile Ministerio de Obras Públicas Dirección de Obras Hidráulicas. Concepción, Chile.
- Centro de ciencias ambientales EULA-Chile. (2000).** *Informe avance de proyecto "Determinación del caudal mínimo ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Quilleco en el río Laja considerando variables asociadas a la biodiversidad y disponibilidad de hábitat".*
- Comité Ambiental Municipal. (2015).** Acta Comité Ambiental Municipal. *Acta Comité Ambiental Municipal*, (pág. 1). San Fabián de Alico, Chile
- Diez, J., & Olmeda, S. (2008).** *Diseño eco-hidrológico de pequeñas centrales hidroeléctricas, evaluación de caudales ecológicos.* Medellín, Colombia.
- 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.
- Illanes, J. (2006).** *Línea de base medio biótico Proyecto "Central Ñuble de pasada".* Gobierno de Chile Ministerio de Obras Públicas Dirección de Obras Hidráulicas. Concepción, Chile.
- Jamett, G., & Rodrigues, A. (2015).** *Evaluación del instrumento caudal ecológico, panorama legal e institucional en Chile y Brasil.* Santiago.
- Jowett, I. (1997).** Intream flow methods: A comparison of approaches. Regulated rivers: Research and Management. En I. Jowett, *Intream flow methods: A comparison of approaches. Regulated rivers: Research and Management.* (págs. 115-127).
- Mendoza, M. (2015).** *Dinámica de los procesos hidrológicos en la cuenca del río Ñuble en San Fabián.* Tesis de pregrado Universidad Católica de La Santísima Concepción. Concepción, Chile.
- MinEnergía. (30 de noviembre de 2015).** *Ministerio de energía.* Recuperado el 27 de noviembre de 2016, de www.energia.gob.cl/tema-de-interes/biobio-la-capital-energetica-de
- MinEnergía. (29 de agosto de 2016).** *Ministerio de energía.* Recuperado el 27 de noviembre de 2016, de www.energia.gob.cl/tema-de-interes/presentan-sistema-de-pronostico
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). (2012).** *Reglamento para determinación del caudal ecológico mínimo.*
- Reiser, P., Ramey, M., Beck, S., Lambert, T., & Geary, R. (1989).** Fusing flow recommendations for maintenance of salmonid spawning gravels in a steep, regulated stream. En P. Reiser, M. Ramey, S. Beck, T. Lambert, & R. Geary, *Fusing flow recommendations for maintenance of salmonid spawning gravels in a steep, regulated stream.* (págs. 267-275).
- Schneider, M., Noack, M., Gebler, T., & Kopecki, L. (2010).** *Handbook for the habitat simulation model.* Module: CASIMIR-Fish. Base version.



UCSC

Simposio de Habilitación Profesional
Departamento de Ingeniería
18 de enero de 2017

SEA. (2016). *Guía metodológica para determinar el caudal ambiental para centrales hidroeléctricas en el SEIA.*

Willmott, C.,Matsura, K.(2012). *Terrestrial Air Temperature and Precipitation: Monthly and Anual Time Series (1900-2010) (Version 3.01)*, Center for Climatic Research, University of Delaware, Newark, Del, USA, 2012