

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Profesor Patrocinante:** Álvaro Suazo Schwencke

**CARACTERIZACIÓN DE OBRAS DE PASO PARA  
PECES EN EMBALSES CON RESOLUCIÓN DE  
CALIFICACIÓN AMBIENTAL**

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS PARA  
OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**MAURICIO NICOLÁS VILLENA PÉREZ**

**Concepción, agosto del 2017**

*Dedicado a cada una de las personas que*

*me apoyaron incondicionalmente*

*en este proceso:*

*Mi padre, Rodrigo Villena G.*

*Mi madre, Liliana Pérez C.*

*Mi hermana, Mackarena Villena P.*

*Mi pareja, Isabel Jara R.*

## **Agradecimientos**

*Cuando decidí comenzar mis estudios en la Universidad del Bío-Bío, particularmente en la carrera de Ingeniería Civil, jamás imaginé lo que realmente sería. No fue fácil dejar mi ciudad y menos a mi familia, sin embargo, ya era momento de comenzar a escribir mi propia historia.*

*Adaptarse a los cambios fue difícil, sin embargo, día a día, se encontraba la forma de avanzar de mejor manera, la presencia de los amigos y el apoyo incondicional de mi familia jugó en ese entonces un rol fundamental ante los innumerables escenarios que la universidad propone.*

*Agradezco profundamente a mis padres, por brindarme la oportunidad de ser un profesional y de enseñarme aquellas cosas que no se aprenden en los colegios ni en las universidades, me refiero a los principios y valores que se transforman en esta etapa, en los pilares fundamentales día a día.*

*Agradezco de forma muy especial a mi pareja Isabel, por su compañía, por brindar su apoyo incondicional en estos seis años y por asumir un rol fundamental en este proceso.*

*Agradezco a mis amigos por la alegría y los buenos momentos vividos.*

*Agradezco a cada uno de los profesores, que formaron parte de mi aprendizaje, pues su labor, entrega y cercanía marcan la diferencia de estudiar en esta Universidad, particularmente agradezco a mi profesor guía, Sr. Álvaro Suazo S. por sus conocimientos y excelente disposición, no sólo en esta etapa, sino también en escenarios anteriores.*

*Agradezco a todos quienes formaron parte de la recopilación de información, de forma muy especial a un Ingeniero Civil egresado de esta universidad, el Sr. Felipe Fuentes C.*

*Finalmente le agradezco profundamente a Dios por la fuerza que me entrega cada día y por la ilusión de seguir viviendo nuevas etapas.*

## INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Justificación del tema.....	5
1.2. Objetivo general.....	6
1.3. Objetivos específicos .....	6
2. ESTADO DEL ARTE .....	7
2.1. Tipos de estructuras transversales.....	7
2.1.1. Clasificación según temporalidad .....	8
2.1.2. Clasificación según materialidad .....	9
2.2. Tipos y características de pasos de peces .....	11
2.2.1. Contexto nacional e internacional .....	11
2.2.2. Requisitos generales para los pasos .....	12
2.2.3. Tipos de pasos .....	14
2.2.4. Aproximaciones al caso chileno.....	15
3. METODOLOGÍA.....	19
3.1. Criterios de inclusión .....	19
3.1.1. Proyectos a revisar .....	19
3.1.2. Antecedentes Considerados.....	20
3.2. Identificación de estructuras transversales y pasos para peces .....	20
3.3. Caracterización de paso para peces construidos .....	21
3.4. Análisis de consistencia .....	22
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	23
4.1. Estructuras transversales identificadas .....	23
4.2. Proyectos con pasos para peces .....	25
4.3. Características de pasos descritos .....	28
4.4. Análisis de consistencia .....	32
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	34
5.1 Conclusiones .....	34
5.2 Recomendaciones .....	35
REFERENCIAS .....	36
ANEXOS .....	38
ANEXO A: Listado de proyectos revisados.....	38

ANEXO B: Generalidades de proyectos e identificación de estructuras transversales.....	38
ANEXO C: Antecedentes y características de pasos para peces identificados .....	38
ANEXO D: Consistencia entre diseño y especie beneficiada .....	38
ANEXO E: Resultados objetivos específicos.....	38

## INDICE DE TABLA

Tabla 1: Identificación y cuantificación de estructuras transversales de Chile con RCA.....	23
Tabla 2: Análisis de inversión de los pasos para peces identificados .....	28
Tabla 3: Antecedentes generales de cada paso.....	29
Tabla 4: Características de pasos para peces identificados.....	30
Tabla 5: Dimensiones de estructuras transversales, asociadas a los pasos para peces en Chile.....	30
Tabla 6: Especie considerada en el diseño según proyecto.....	31
Tabla 7: Análisis de consistencia entre el diseño del paso y la especie beneficiada.....	32

## INDICE DE FUGURAS

Fig.1 a: Clasificación de estructuras según temporalidad.....	20
Fig.1 b: Clasificación de estructuras según material.....	21
Figura 2: Tipos de pasos para peces.....	21
Figura 3: % De estructuras transversales que poseen pasos para peces en Chile.....	25
Figura 4: Cuantificación de pasos para peces en Chile, según tipos de estructura transversal.....	26
Figura 5: Clasificación de pasos según aspecto de diseño.....	27
Figura 6: Identificación de pasos para peces en Chile.....	27

## **CARACTERIZACIÓN DE OBRAS DE PASO PARA PECES EN EMBALSES CON RESOLUCIÓN DE CALIFICACIÓN AMBIENTAL**

**Autor: Mauricio Villena Pérez**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo Electrónico: [mwillena@alumnos.ubiobio.cl](mailto:mwillena@alumnos.ubiobio.cl)

**Profesor Patrocinante: Álvaro Suazo Schwencke**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo Electrónico: [asuazo@ubiobio.cl](mailto:asuazo@ubiobio.cl)

### **Resumen**

En Chile, los pasos para peces forman parte de las posibles medidas de mitigación ante el impacto generado por la construcción de estructuras transversales. Uno de los impactos más dramáticos corresponde al denominado efecto barrera. Este consiste en la segregación del hábitat fluvial a causa del emplazamiento de una estructura transversal. Estas situaciones alteran por completo las condiciones naturales del río y los movimientos migratorios de las diferentes especies de peces que habitan en él. El objetivo de este proyecto de título, es caracterizar los pasos para peces existentes en Chile. Esto permite evaluar el estado actual de estas obras y evidenciar las principales dificultades en su diseño. Para llevar a cabo esta investigación, se realizó una selección de 49 proyectos ingresados al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental SEIA, identificando y caracterizando el tipo de estructura trasversal, así como también el paso de peces implementados. Finalmente se realizó una evaluación de cada uno de los pasos identificados considerando criterios internacionales y aproximaciones al escenario nacional. Las conclusiones muestran que, hasta la fecha, existen pocos pasos para peces implementados en Chile. Si bien el mérito por diseñarlas es válido, esto se ha realizado bajo el desconocimiento de aspectos fundamentales relacionadas a las condiciones especie específicas del lugar donde se construyen los pasos.

**Palabras claves:** Efecto barrera, Paso para peces, Medida de mitigación.

9.486 Palabras Texto + 6 Figuras/7 Tablas\*250 + 0 Figuras\*500= 12.736

## DESCRIPTION OF THE CHARACTERISTICS OF FISH PASSES FACILITIES IN RESERVOIR WITH ENVIRONMENTAL QUALIFICATION PERMIT

**Author: Mauricio Villena Pérez**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío Bío

Email: [mwillena@alumnos.ubiobio.cl](mailto:mwillena@alumnos.ubiobio.cl)

**Advisor: Álvaro Suazo Schwencke**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío Bío

Email: [asuazo@ubiobio.cl](mailto:asuazo@ubiobio.cl)

### Abstract

In Chile, fish passes are part of the possible mitigation measures given to the impact generated by the construction of transverse structures. One of the most dramatic impacts corresponds to the so-called "barrier effect". This consists of the segregation of fluvial habitat because of the construction of a transverse structure. These situations completely alter the natural conditions of the river and the migratory movements of the different species of fish that inhabit it. The objective of this work is to characterize the fish passes existing in Chile. This allows to evaluate the current state of these works and to highlight the main difficulties in their design. To carry out this research, a selection of 49 projects entered into the EIAS, Environmental Impact Assessment Service (SEIA in Spanish) was carried out, identifying and characterizing the type of transverse structure, as well as the kind of fish passage implemented. Finally, an evaluation of each of the identified passes was performed considering international criteria and approaches to the national scenario. The conclusions show that, to this date, there are few fish passes implemented in Chile. Although the merit to design them is valid, this has been done under the ignorance of fundamental aspects related to the specific conditions of the place where the steps are constructed.

**Key Words:** Barrier effect, Fish passage, Mitigation measure

## 1. INTRODUCCIÓN

Chile es un país poseedor de un gran número de ríos, los que como consecuencia de la disposición del relieve y la estrechez del territorio en general, son de corta longitud, de escaso caudal, torrentosos e inapropiados para la navegación. Los ríos de Chile varían según la ubicación geográfica; los del norte por ejemplo tienen régimen nivoso, los del centro mixto y los del sur pluvial (INE, 2016).

En general, los ríos de Chile presentan gran potencial hidroeléctrico. Sin ir más lejos, en la actualidad este país posee una capacidad energética instalada asociada al sector hidráulico que representa un 39,5 % de los 16.742 MW correspondiente al total del potencial generado por los diferentes sectores energéticos (térmico, eólico, solar e hidráulico) (SIC, 2017).

Debido a esta estrecha relación entre las necesidades energéticas y agrícolas con respecto a los cauces fluviales del país, es que se debe tener un amplio conocimiento de éstos y del hábitat en el cual se encuentran insertos, pues en ellos se desarrollan gran cantidad de especies animales y vegetales que pueden verse fácilmente alteradas por actividades antrópicas desarrolladas en el lugar.

Es importante considerar que la composición, estructura y funcionamiento de estos ecosistemas son dinámicos y se encuentran en continuo movimiento a causa de las corrientes fluviales, las que ante cualquier desequilibrio en el régimen hidrológico de los ríos (parámetros físico-químicos de las aguas, velocidad de la corriente, profundidad del río, morfología del cauce, anchura del lecho, concentración de sustancias y la temperatura de las aguas), pueden generar impactos ambientales tanto en el lugar donde se encuentra emplazada la obra, como en zonas posteriores (Sanz Ronda et al., 2006).

De acuerdo a esto, es fácil inferir que casi ningún otro ecosistema exhibe tanta diversidad en su estructura y funcionamiento, generando tan amplia gama de especies vegetales y animales. No obstante, es probable que tampoco exista otro ecosistema que se utilice de las mismas medidas para las actividades humanas o se vea altamente impactado por la contaminación o alteraciones estructurales (Marmulla and Welcomme, 2002).

Uno de los efectos ambientales de mayor importancia en los hábitats acuáticos corresponde al efecto barrera (Meier, 2011). Este es ocasionado por diferentes estructuras transversales presentes

en los ríos, las que independiente de su uso y materialidad, afectan directamente a la fauna íctica asociada al lugar de emplazamiento de la obra, limitando parcial o totalmente los diferentes movimientos migratorios de peces e invertebrados bentónicos menos móviles.

La conectividad longitudinal en los ríos cumple un rol fundamental, pues facilita los diferentes movimientos efectuados en distintas escalas de magnitud al interior del cauce. Las motivaciones de dichos movimientos son múltiples, sin embargo, pueden clasificarse de acuerdo al carácter migratorio y objetivo correspondiente cada una de estas. De esta forma se observan migraciones asociadas a la reproducción, al equilibrio de densidad poblacional, búsqueda de alimento y finalmente refugio en tiempos de estío.

Estas consideraciones ambientales no son nuevas, pues desde aproximadamente veinte años que estas medidas forman parte de las exigencias y requerimientos de proyectos asociados a estructuras transversales. Bajo este contexto la existencia de estructuras que asisten el paso de los peces en Europa y Norteamérica, forma parte de los requerimientos legales y prácticas comunes de construcción de presas, implementándose incluso en estructuras transversales existentes (Meier, 2007).

En Chile, los proyectos que pudiesen generar potenciales impactos ambientales deben ingresar un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o una Declaración de Impacto Ambiental (DIA), según sea pertinente, al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Este servicio, entre muchas cosas, busca reducir en su máxima expresión los impactos ambientales, exigiendo identificar y posteriormente proponer medidas efectivas de mitigación, reparación y compensación. No obstante, aún falta mucho por mejorar en cuanto a las exigencias y formas de evaluación del sistema chileno (Meier, 2011).

Este proyecto de investigación busca aportar en este largo camino, que sin duda se deben recorrer de forma responsable y comprometida hacia el país.

## 1.1. Justificación del tema

De acuerdo al plan “Política de energía 2050” la hidroelectricidad seguirá siendo una fuente relevante en la matriz energética (Ministerio de Energía, (2014). Esto sumado al creciente aumento de las necesidades agrícolas e incluso de suministros básicos como el agua potable, hace fácil suponer que muchos de los ríos y lagos chilenos serán intervenidos en un corto y mediano plazo (Goodwin et al, 2006). En consecuencia, existirá aumento en los potenciales impactos ambientales causados por este tipo de obras, afectando directamente a los sistemas fluviales y organismos vinculados a ellos.

Este proyecto, en particular, está estrechamente relacionado al efecto generado por las diferentes estructuras transversales existentes en Chile y su impacto en la conectividad longitudinal de las distintas especies de peces presente los ríos intervenido.

Hoy el escenario para los peces nativos de agua dulce es alarmante, pues existe una sostenida disminución de sus rangos de distribución y de sus tamaños poblacionales en ríos y lagos chilenos (Vila et al. 1999, Gajardo et al. 2003, Habit et al. 2006a y 2006b, Soto et al. 2006). Pese a esto existen muy pocos estudios orientados a los impactos directos e indirectos que afectan a los peces nativos de Chile, lo que sin duda corresponde a un real inconveniente al momento de diseñar pasos en función a la realidad chilena (García-Lancaster 2006, Habit et al. 2006, Link and Habit, 2014).

En el marco de esto, el presente proyecto busca realizar una evaluación general de aquellas obras que consideran paso de peces, cuantificando su existencia y caracterizándolas. Además, busca analizar la consistencia entre el paso y las especies considerada en el diseño, lo que permitirá conocer consideraciones existentes hasta ahora, evidenciando aquellos aspectos débiles, en favor de los organismos afectados.

## **1.2. Objetivo general**

- ❖ Realizar una evaluación general de las características y criterios de diseño de pasos para peces, en embalses nacionales de diferente uso que cuenten con Resolución de Calificación Ambiental.

## **1.3. Objetivos específicos**

- ❖ Identificar los tipos de estructuras transversales existentes en Chile, observando la existencia de estructuras que permiten la circulación de la fauna íctica.
- ❖ Caracterizar los tipos de pasos para peces existentes en embalses nacionales, recopilando antecedentes y características de diseño utilizados.
- ❖ Analizar la consistencia entre el diseño del paso para peces y las especies consideradas en el diseño, de acuerdo a recomendaciones extranjeras y aproximaciones a la realidad nacional.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

Este proyecto considera aquellas obras ingresadas al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) con tipología “a- a.1” y “c”; donde de acuerdo al reglamento del SEIA “a-a.1” se refiere a “Presas cuyo muro tenga una altura superior a cinco metros (5 m), o que generen un embalse con una capacidad superior a cincuenta mil metros cúbicos (50.000 m<sup>3</sup>)”, mientras que “c” se refiere a “Centrales generadoras de energía mayores a 3 MW”. Además, se realizará una evaluación general de las características y criterios de diseño de “Pasos para peces” en embalses nacionales de diferente uso con Resolución de Calificación Ambiental (Legislación chilena, 2014)

En el presente capítulo se realizará una descripción y clasificación de las obras mencionada, de acuerdo a antecedentes y recomendaciones nacionales e internacionales.

### **2.1. Tipos de estructuras transversales**

Este tipo de estructuras son empleadas principalmente en bocatomas. Habitualmente estas obras son construidas con la finalidad de abastecer de agua a la agricultura, la generación de electricidad, población rural y urbana, la industria y la minería (MOP, 2009).

La barrera transversal corresponde a uno de los elementos principales de una bocatoma. Esta tiene la finalidad de contener el agua de un cauce y peraltar su nivel para introducirla en un canal o zanja de aducción para su posterior uso (MOP, 2009). La estructura transversal forma parte importante del presupuesto de una bocatoma y pudiera eventualmente prescindirse de ellas si las condiciones de captación de agua del río así lo permitieran.

Pueden clasificarse según diversos criterios; sin embargo, para efectos de este proyecto y según la realidad nacional, su clasificación se realizará de acuerdo a la temporalidad y materialidad de la estructura transversal.

### *2.1.1. Clasificación según temporalidad*

#### a) Temporal

Son aquellas estructuras asociadas a bocatomas de igual condición, cuyos estándares de construcción no permiten el funcionamiento continuo, pues requieren de mantenimiento habitual entre una temporada y otra por no contar con los elementos necesarios para el manejo de fenómenos físicos y requerimientos de operación que se presentan. Usualmente este tipo de estructuras cumplen funciones agrícolas, y no requieren de estándares ingenieriles muy profundo (MOP, 2009).

#### b) Definitivas

Este tipo de estructuras posee materiales resistentes y son diseñadas y calculadas para funcionar de forma permanente. Además, cuentan con todos los elementos necesarios para el manejo de variables naturales como crecidas y sedimentaciones. Esta clasificación se encuentra asociada principalmente a sus formas de operación de la siguiente manera:

-Fija: Habitualmente son construidas en hormigón o grandes rocas consolidadas con este mismo (MOP, 2009). Deben cumplir con propiedades mecánicas necesarias que aseguren un buen comportamiento dinámico de la estructura. La altura de coronamiento incluye altura de revancha sobre el muro, lo que permite algunas fluctuaciones en el nivel del agua.

-Móvil: Generalmente son complementarias o alternativas a las barreras fijas. Pueden presentarse en diferentes materiales como madera, acero o como tecnologías más recientes, como lo son los Rubber Dams (barreras de goma, cuyas variaciones volumétricas permiten el control de crecidas y niveles del flujo según los requerimientos del momento).

-Mixta: Son el tipo de estructuras mayormente utilizadas. Estas combinan ambos elementos de las estructuras descritas anteriormente, lo que facilita el manejo operacional programado y asociado a los eventos de contingencia.

### 2.1.2. Clasificación según materialidad

#### a) Terraplén

Estas estructuras representan entre el 85 y 90% del total de presas construidas en el mundo. Son obras de gran tamaño y volumen, pues su estabilidad y comportamiento se encuentran directamente relacionados a la masa de la estructura. Las pendientes de las caras aguas arriba y aguas abajo son similares y de ángulo moderado (Novak ,2010). De acuerdo a los materiales utilizados estas estructuras pueden clasificarse como earthfill y rockfill, no obstante, en la práctica estas pudiesen combinarse presentando núcleos impermeables en interacción con materiales granulados de alta permeabilidad, lo que en su conjunto aportan estabilidad a la estructura.

- Earthfill: Consiste en aquellas presas de tierra, donde más del 50% del suelo utilizado en su elaboración está conformado por arenas, arcillas y limos de permeabilidad media baja. Estos materiales por lo general son encontrados en el lugar donde se encuentra emplazada la obra y deben tener las propiedades mecánicas necesarias para asegurar su óptimo comportamiento. Sin duda esto se muestra como una ventaja disminuyendo así, el costo de su construcción. Este tipo de presas son construidas mediante la compactación de capas relativamente delgadas y humedad controlada. (Novak ,2010).

- Rockfill: Reciben este nombre aquellas presas cuya materialidad presentan más del 50% correspondientes a materiales granulares como gravas o rocas fragmentadas. Estas estructuras cuentan con una membrana de impermeabilización de tierra compactada o un hormigón delgado. El método de construcción es similar al empleado en presas tipo earthfill (Novak ,2010).

#### b) Hormigón

Las presas de hormigón, presentan características estructurales que favorecen a la capacidad de adaptación de la estructura en función de las condiciones del sitio; poseen altas exigencias con respecto a las condiciones de fundación, requiriendo roca sólida y estable. Consideran además costos unitarios por metro cúbico más elevados que el resto de las presas, no obstante, la optimización de su diseño permite otorgar mayores resistencias con menores volúmenes de hormigón (Novak ,2010). Este tipo de presas se clasifica de la siguiente forma:

- Gravedad: La estabilidad de este tipo de presas depende principalmente de su masa. En cuanto a su forma, poseen un perfil de estabilidad trapezoidal, lo que ayuda a controlar los excesos de tensiones del flujo aplicadas en la base de la estructura. En algunos casos, el diseño considera leves curvaturas de carácter estético y en algunos casos con finalidad estructural. Estas últimas reciben el nombre de presas de arco-gravedad.

- Presa contrafuerte: Pueden clasificarse conceptualmente como una versión aligerada de las presas de gravedad, pues al igual que estas presentan una cara ascendente continúa en la cara de aguas arriba, no obstante, en su cara opuesta (aguas abajo) se encuentra reforzada por estructuras denominadas contrafuerte, que se encuentran adosadas al muro y su forma ayuda a controlar las zonas de mayores cargas.

- Arco: Poseen una marcada curvatura en la cara de aguas arriba, su forma permite distribuir las tensiones de forma radial y de manera equitativa, transmitiendo estas fuerzas principalmente hacia los pilares y a los costados del valle. Estructuralmente son más eficientes que las presas de gravedad e incluso que las contrafuerte, reduciendo considerablemente los volúmenes de hormigón. Existen algunas derivaciones más complejas como las cúpulas que consideran doble curvatura, tanto en el sentido horizontal como en el vertical optimizando de esta forma los volúmenes de hormigón requeridos.

- Otros tipos: El resto de las presas de hormigón, pueden considerarse como variantes menos comunes de las estructuras anteriormente descritas. Existen por ejemplo las denominadas gravedad hueca, contrafuerte adornado, arco múltiple, entre otros. Sus nombres son explícitos y su apariencia son derivaciones de las estructuras anteriores.

### c) Compuerta

Generalmente estas estructuras forman parte de un complemento del resto ya descritas y cumplen funciones operacionales relevantes. No obstante, en este proyecto en el que se consideran obras con tipología SEIA “a” y “c”, podría prescindirse de barreras más sofisticadas, considerando únicamente compuertas.

Estas pueden clasificarse como planas, construidas mayormente en acero o madera. También existen las denominadas compuertas de sector, cuya forma es similar a un trozo de arco y su materialidad es habitualmente acero. Esta se encuentra soldada a una estructura metálica que puede girar en dos ejes o muñones anclados a la estructura de soporte.

Existen últimas tecnologías como los Rubber Dams. Estas corresponden a estructuras de goma, que mediante variaciones volumétricas permiten controlar el flujo de forma dinámica, adaptándose a las condiciones operacionales del momento.

## **2.2. Tipos y características de pasos de peces**

En el presente capítulo se profundizará acerca de la realidad internacional de este tipo de estructuras, considerando clasificación y aspectos de diseño más usuales. Además, se presentarán algunas aproximaciones de las antes mencionadas, con respecto al caso chileno.

### *2.2.1. Contexto nacional e internacional*

Los pasos de peces son estructuras que otorgan conectividad longitudinal en ríos que han sido intervenidos mediante barreras transversales de diferente uso, como represas, vertederos y alcantarillas bajo caminos. Hoy la conectividad longitudinal entregada por los diferentes pasos de peces no sólo se entiende como la asistencia al paso de estos mismos, sino también como una posibilidad de brindar continuidad al hábitat acuático en general (Link and Habit, 2014).

Las estructuras transversales generan impactos directos e indirectos sobre el cauce intervenido, entre las que se destacan, por ejemplo, transformaciones de hábitat fluvial a lacustre, cambios en la disponibilidad del hábitat fluvial en zonas posteriores a la represa, restricciones al movimiento de los diferentes organismos acuáticos, alteraciones en la calidad de las aguas y alimentos, entre otros (García-Lancaster, 2006; Habit et al,2006).

Dentro de los impactos más perjudiciales, se tiene un fenómeno denominado aislamiento génico. Este ocurre debido a la fragmentación del hábitat a causa de una o más barreras, y es el principal responsable de la disminución en la diversidad genética de las diferentes especies de peces nativas de nuestro país (Link and Habit, 2014).

Bajo este contexto, los pasos de peces surgen como una de las medidas de mitigación más importantes en la reducción de impactos ambientales ocasionados por las obras transversales ya mencionadas. Sin embargo, los buenos resultados de esta medida de mitigación se encuentran condicionados por el conocimiento y consideración de aspectos biológicos y ecológicos como el tipo de hábitat de los peces, preferencia alimentaria, comportamiento en el medio hidráulico, depredadores, patrones de migración, tipo de movimientos migratorios, tamaño de los peces, modo

de nado, propiedades sensitivas como olfato, sensibilidad acústica, ritmos cardiacos, entre otros (Link and Habit, 2014).

La mayoría de los pasos de peces han sido desarrollado en ríos del hemisferio norte y están diseñados para el paso de grandes especies migratorias (principalmente salmónidos) (sanxy Powers, 1986; Bell, 1990; Clay, 1995; OTA, 1995; Odeh 1999). No obstante, la experiencia en la construcción y mantenimiento demuestran que los criterios empleados en los pasos para especies salmónidas (truchas y salmones) no son adecuados para especies nativas existentes en Chile, clasificados como peces no deportivos (tamaño inferior a 15 cm) (Link and Habit, 2014), y lo que es peor podría incluso favorecer la propagación de especies introducidas en desmedro de los peces nativos chilenos.

### *2.2.2. Requisitos generales para los pasos*

A continuación, se darán a conocer los principales aspectos relacionados al buen diseño y funcionamiento de los pasos para peces en general. Estos requisitos están asociados a recomendaciones extranjeras basadas principalmente en FAO-DVWK (2002). Es importante destacar que cada una de estas recomendaciones se encuentra condicionada por el flujo y la especie considerada en el diseño, por lo que pueden presentar variaciones según las especies y condiciones sitio-específicas del país.

#### *a) Posición óptima*

El paso debe estar posicionado en la dirección del flujo natural del cauce. Debe ubicarse preferentemente en las orillas del río intervenido, en lugares de corrientes lentas, evitando zonas muertas. En el caso de presas de uso hidroeléctrico, el paso debe ubicarse inmediatamente a los pies del muro, cercano al flujo de salida de la turbina, aprovechándolo como atracción al paso.

#### *b) Entrada y flujo de atracción*

La entrada al paso debe ubicarse inmediatamente posterior al muro. Mientras más aguas abajo se encuentra la entrada, mayor debe ser el flujo de atracción del paso. La velocidad del flujo al interior del paso debe variar entre 0,8 a 2 m/s. El ángulo de la entrada con respecto a la dirección del cauce no debe superar los 45°; esto ayuda a reducir los tiempos de búsqueda y evita que los peces se dirijan hacia la mitad de la barrera transversal.

### c) Salida

En el caso de presas de uso hidroeléctrico, la salida del paso debe ubicarse a una distancia superior a 5 m de la captación de agua turbinada. Si la velocidad del flujo en la cabecera de la presa es superior a 0,5 m/s la salida debe prolongarse hasta encontrar dicha condición. Esto contribuye a que posterior a la utilización del paso, los peces pueden continuar sin problemas. Las fluctuaciones de altura del flujo en la salida del paso, deben ser evitadas al máximo. Para fluctuaciones entre 0,5 a 1 m, es recomendable el uso de pasos tipo “Vertical slot” (piscinas cuyo paso se realiza a través de ranuras verticales), pues debido a su diseño permite funcionar sin problemas en el rango de fluctuaciones mencionados. Para fluctuaciones superiores a 1 m, es recomendable otorgar diferentes alturas de salida para cada medida de fluctuación. Otras opciones menos recomendadas corresponde al uso de compuertas, cámaras de unión de flujos y ascensores.

### d) Longitudes, pendiente y piscinas de descanso

Los parámetros de diseños asociados al comportamiento hidráulico del flujo corresponden a la pendiente longitudinal, ancho útil, longitud y profundidad del paso. Todos estos parámetros están condicionados por las características de la especie objetivo a la cual buscan otorgar asistencia en el paso y deben basarse principalmente en la capacidad de nado de los peces asistidos. A su vez la capacidad de nado se encuentra descrita por la longitud del pez, modo de nado y rendimiento. Este último se relaciona directamente con características como maniobrabilidad, velocidad de natación, aceleración, gasto de energía y tiempo de fatiga.

### e) Mantenimiento

El mantenimiento es una de las actividades críticas en el buen funcionamiento del paso y debe ser considerado desde la planificación inicial. Muchos de los pasos de peces fracasan, no por falencias ingenieriles, si no por una mala planificación en el mantenimiento de la estructura. Los pasos del tipo natural requieren de menos mantención.

### f) Medida para proteger pasos

El cuidado principal es evitar cualquier actividad de pesca o deporte que pudiese intervenir en el comportamiento de los peces, pues estos son muy sensibles a ruidos e iluminación, entre otras cosas.

### g) Integración con paisaje

Los pasos de peces otorgan la posibilidad de mantener la conectividad del hábitat del cauce intervenido en todas sus formas. Debido a esto es que el diseño debe ser lo más amigable con el medio ambiente y contribuir de esta forma, con la reducción de impactos ambientales visuales propios de una estructura transversal.

### 2.2.3. Tipos de pasos

A continuación, se darán a conocer los distintos tipos de pasos y su relación con el escenario nacional. La clasificación más general de los pasos de peces puede ser en función a su aspecto y se conocen como pasos naturales o técnicos.

#### a) Pasos naturales

Los materiales de construcción son principalmente rocas. Están implementados de acuerdo a la geomorfología y variables hidráulicas tales como el caudal y pendientes asociadas al lugar donde se construyen. Estos son los más convenientes y efectivos, pues no sólo cumplen con el objetivo de permitir el paso de peces, si no también otorga conectividad al hábitat intervenido, reduciendo en gran medida el impacto generado por la alteración del régimen hidrológico (véase, por ejemplo, Cowx y Welcome 1998). Los tipos de pasos naturales se conocen como:

- ❖ Bypass channel
- ❖ Bottom ramp slot
- ❖ Fish ramp

#### b) Pasos técnicos

Son construidos principalmente de acero, hormigón o madera, son útiles para un número limitado de especies. Existen diversos tipos como:

- ❖ Escala de artesa - Tipo piscina.
- ❖ Vertical Slot.
- ❖ Pases de Denil.
  - Ralentizadores de fondo.
  - Ralentizadores laterales.
  - Ralentizadores mixtos.
- ❖ Escaleras de anguilas.

- ❖ Ascensores de peces.
- ❖ Esclusas de pescado.
- ❖ Culvert fishway.

#### 2.2.4. Aproximaciones al caso chileno

Los pasos de peces más utilizados y la relación con la realidad nacional se describen de la siguiente forma:

##### a) Escaleras para peces

Corresponden al método más utilizado. Se encuentran las escaleras tipo pozón y las escaleras tipo pantalla (Clay, 1995). La escalera tipo pozón son todas aquellas escaleras cuyo concepto de funcionamiento está basado principalmente en la disipación de energía del flujo mediante desniveles generados por orificios y vertederos, los que permiten el paso de los peces ya sea nadando o saltando respectivamente (Meier, 2007). Además, otorga la posibilidad de descanso en los pozones, lo que facilita el paso a través de la estructura. De acuerdo a su funcionamiento hidráulico, la especie objetivo, el número de peces y la flexibilidad del caudal de operación pueden ser diferenciadas como escala de Artesa o Vertical Slot-Ranuras verticales (Clay, 1995). Todos estos tipos de escaleras poseen entrada, conducto y salida (referido al paso del pez, no al caudal circulante).

Las escaleras tipo pozón han tenido un buen desempeño en Europa, permitiendo el paso de especies de gran tamaño (Meier, 2007), incluso asistiendo de buena forma el paso de especies de menores tamaños y con bajas capacidades de nado (Travade et al, 1998; Cowx y Welcomme, 1998; Larinier y Marmulla, 2001). En el caso de Chile el tamaño de los peces nativos está muy por debajo al de los peces europeos, en consecuencia, las capacidades de nado son también mucho menores. Este escenario podría implicar diferencia de altura entre pozones muy pequeñas, y por ende en presas de altura considerable se requerirían mayores longitudes de construcción, sin embargo, de acuerdo al tamaño reducido de las especies nativas chilenas, esta desventaja podría ser compensada, pues si bien aumentaría el número de pozos, la longitud de estos, eventualmente sería menor. Las escaleras tipo pozón suelen tener pendientes del orden de 10-12% (Meier, 2007), lo que encarecería notoriamente los costos y la factibilidad de la obra.

Con respecto a los niveles de operación del flujo, las escaleras tipo artesa, requieren de niveles constantes. Sin embargo, en el caso de tener mayores fluctuaciones es recomendable utilizar pasos con ranuras verticales.

Las escaleras tipo Denil presentan pantallas dispuestas de forma lateral, en el fondo o ambas y se basa principalmente en disminuir las velocidades del flujo generando recirculación y facilitando el paso de los peces. Estas pueden operar con mayores fluctuaciones de nivel y cuentan con mayores pendientes longitudinales (12-20%), lo que genera menores longitudes y por ende menores cotos. No obstante, debido a sus altas pendientes y velocidades del flujo, esta alternativa no formaría parte de las soluciones a los peces nativos chilenos, pues requiere de altas capacidades de nado, propia de los peces de mayor tamaño como los existentes en el hemisferio norte del mundo.

#### b) Ascensores y esclusas para peces

Los ascensores son sistema mecánico que captura a los peces al pie de la barrera en una cabina de capacidades adecuada (mediante la ayuda de un caudal de llamada) y que los eleva y derrama en la parte superior del obstáculo (Tecnoma, 2017). El costo de construcción es variable según la altura. Sin embargo, para desniveles inferiores a 8 m posee costos similares a los pasos tipo pozo o Denil. Este tipo de solución resulta ser óptima en el caso de presas de gran altura (sobre 8m), donde pudiesen existir valores inferiores a los pasos ya mencionados. Sin embargo, debido al funcionamiento cíclico resultan ser muy selectivas, además de presentar altos costos de operación por las continuas mantenciones.

Otra desventaja, es que los peces atraídos deben mantenerse al interior del paso mientras se realiza el llenado de la estructura a capacidad. Esto se realiza mediante el uso de rejillas que restringen la salida de los peces ingresados, no obstante, estas no pueden ser demasiado finas, por lo que el sistema se hace incompatible para el tipo de peces chilenos (Meier, 2007).

Bajo este contexto, los ascensores y esclusas no han tenido un buen desempeño, incluso con especies conocidas en Europa y Norteamérica. De acuerdo a esto y la realidad chilena es una alternativa poco efectiva y no se traduce en una reducción importante de los impactos ambientales generados por una estructura transversal (Meier, 2007).

#### c) Colección y transporte de peces

Esta alternativa es una medida temporal, mientras se construyen soluciones definitivas que permitan asistir el paso de los peces a través de la barrera transversal. No obstante, es una medida

que podría aplicarse de forma definitiva en aquellos casos que no se puedan generar las condiciones necesarias para atracción de peces o las alturas a sortear sean demasiado grandes (Meier, 2007). Sin embargo, esta solución debe aplicarse cuidadosamente considerando aspectos como el conocimiento de la fauna del área donadora y receptora de organismos y así como el ambiente donador y receptor teniendo especial cuidado en el momento en que se trasladan los individuos, debido a su alta sensibilidad a factores externos que pudiesen ocasionar daños (Ibáñez and Sepúlveda, 2010).

#### d) Cauces bypass imitando cursos naturales de agua

Este tipo de solución consiste en realizar un paso de características similares al río intervenido, otorgando condiciones de escurrimiento (pendientes y velocidades) y hábitats similares (características morfológicas y bioquímicas). Esto ayuda a reducir de forma muy eficiente el impacto causado por la barrera transversal.

La gran ventaja que presenta este tipo de pasos naturalizados, es que no sólo otorgan facilidades al movimiento migratorio de los peces, sino también favorecen la entrega de continuidad del hábitat. Este concepto es la clave en el diseño de este tipo de estructuras, pues el otorgar continuidad en el hábitat no sólo soluciona la problemática asociada a los peces, sino también a las diversas especies fluviales, permitiendo de esta forma un mayor número de individuos beneficiados con una medida que por cierto posee mayor valor paisajístico (Link and Habit, 2014).

Este tipo de pasos poseen pendientes bajas, del orden del 1-5%, por lo que son preferentemente utilizadas para desniveles menores. Esta situación pudiera parecer una desventaja, sin embargo, el futuro energético chileno, apunta directamente al desarrollo de pequeñas centrales de pasada, por lo que este tipo de alternativas podrían ser perfectamente implementadas en este país (Meier, 2007).

Este tipo de pasos presenta poca mantención, pero, al igual que los pasos técnicos debe estar correctamente diseñado, considerando las características sitio-específicas del lugar, los diferentes tipos de ríos (Nanson y Croke, 1992), tipo de nado de la especie beneficiada y los requerimientos del hábitat.

#### e) Rampas inclinadas de enrocado

Los pasos tipo Rampa, forman parte íntegra de las estructuras transversales y al igual que los cauces bypass corresponden a soluciones naturalizadas, donde se busca imitar condiciones morfológicas del sustrato del río, así como las condiciones del escurrimiento. Estas estructuras pueden estar

construidas de enrocados o bien disponiendo bolones sobre una base estable de hormigón. Poseen una pendiente aproximada de 1:20 a 1:30 y tienen un funcionamiento óptimo con velocidades de flujo del orden de 1,6 a 2 m/s, asociado a profundidades del flujo no menor a 60 cm (Marmulla and Welcomme, 2002). La principal ventaja de este tipo de solución es que la estructura está posicionada dentro del mismo cauce, al pie de la presa, lo que facilita que los peces puedan encontrarla rápidamente (Link and Habit, 2014).

### **3. METODOLOGÍA**

Este capítulo muestra la estrategia implementada para el desarrollo del proyecto, considerando cada uno de los objetivos planteados y los aspectos relevantes asociados a estos.

#### **3.1. Criterios de inclusión**

Este proyecto de título, consiste en una revisión de antecedentes de proyectos ingresados al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) (Sea.gob.cl, 2017). Cada uno de estos posee diversas concepciones. Con respecto a esta investigación, el número de proyectos estudiados corresponde a 49. Los procedimientos y criterios de selección se muestran a continuación.

##### *3.1.1. Proyectos a revisar*

El listado de proyectos a revisar se obtiene a partir de la aplicación de filtros.

##### i) Estado del proyecto

Se analizaron todos aquellos proyectos cuyo estado de evaluación es “aprobado”, es decir, se haya dado cumplimiento a todas las exigencias, de acuerdo a la identificación de impactos ambientales y a la aplicación de medidas de mitigación, reparación y/o compensación de estos. Dicho estado de aprobación evita encontrar duplicidades del proyecto que se encuentren en otro estado, como en tramitación o rechazo.

##### ii) Tipo de presentación del proyecto

Los proyectos revisados corresponden a aquellos ingresados al SEIA, por medio de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), en concordancia del artículo 11 de la ley 19300, donde se establece bajo qué efectos, características o circunstancias se requiere de un EIA. En el caso de este proyecto de título, los efectos asociados a los proyectos analizados corresponden a “Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire”, entre otros.

##### iii) Tipología del proyecto

La tipología del proyecto corresponde a la letra asignada en el listado de tipologías susceptibles a causar impacto ambiental. En este caso estas corresponden a la tipología a.1 y c entregadas en el artículo 10 de la Ley N°19.300 (Legislación Chilena, 2010) y artículo 3 del DS N°40 de 2014

(Legislación Chilena, 2014). Se excluyen tranques de relave y centrales generadoras del tipo termoeléctrica, por no tener cauce y forma natural asociada.

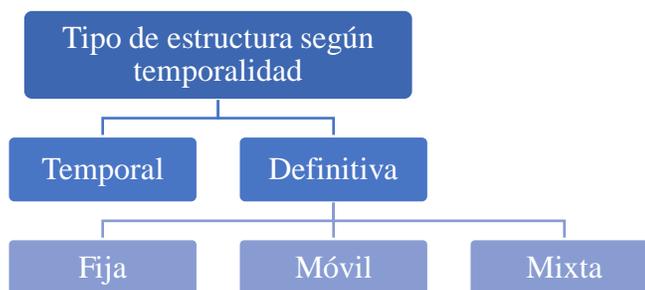
### 3.1.2. Antecedentes Considerados

El documento principalmente analizado de cada proyecto, corresponde a la resolución de calificación ambiental (RCA). En él se encuentra información relevante del proyecto, asociado a su descripción general, identificación de impactos ambientales, medidas de mitigación, reparación y/o compensación, las que en conjunto buscan reducir el impacto ambiental en el área de influencia del proyecto. La RCA permite identificar y clasificar el tipo de estructura transversal, así como el tipo de paso de peces implementados. Sin embargo, la información entregada en cada proyecto fue diferente y para complementarla, fue necesario recurrir a otros antecedentes como informes, adendas, anexos y planos.

### 3.2. Identificación de estructuras transversales y pasos para peces

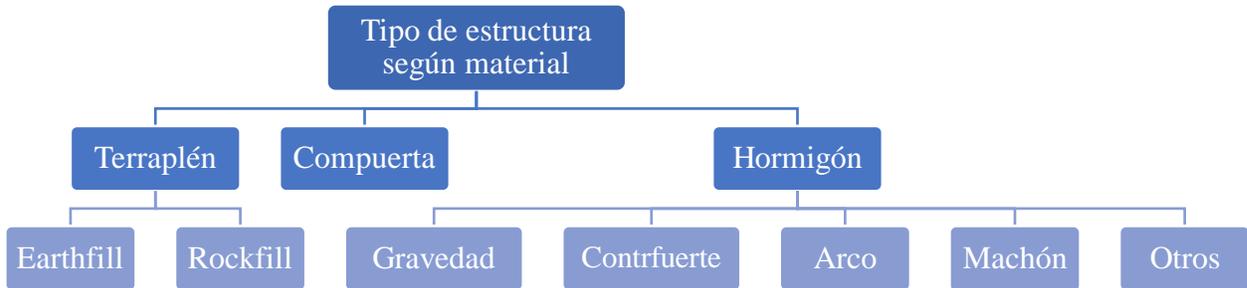
Del listado de proyectos sujetos a revisión, se identifican los siguientes aspectos generales: nombre del proyecto región, tipología, fecha de calificación, titular, nombre del río, caudal de generación, altura de generación y tipo de estructura transversal implementada.

La estructura transversal de cada proyecto se clasificó según las figuras 1.a y b



**Figura 1 a. Clasificación de estructuras según temporalidad**

(Fuente: Elaboración propia, 2017)



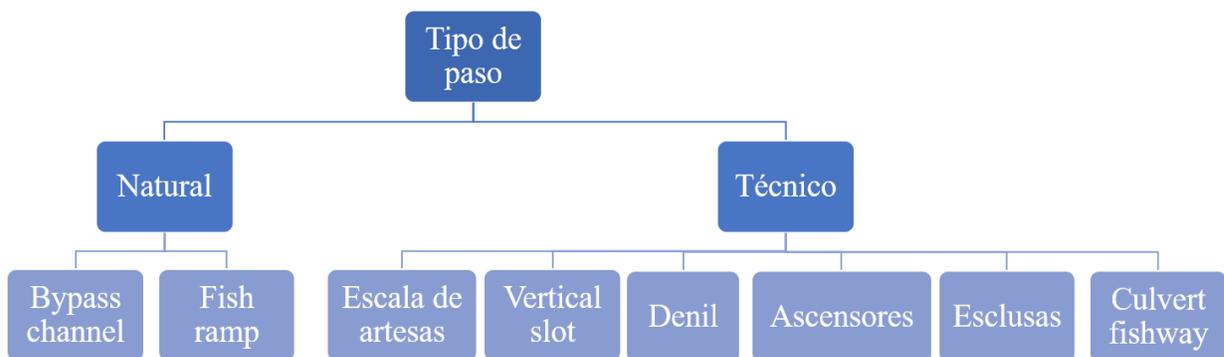
**Figura 1 b. Clasificación de estructuras según material**

(Fuente: Elaboración propia, 2017)

Finalmente, se resumen los antecedentes asociados a la identificación de los tipos de estructuras transversales y sus respectivos pasos, en el caso de aquellos que los tuviesen. Esto permite cuantificar dichas estructuras teniendo mayor claridad de la realidad nacional.

**3.3. Caracterización de paso para peces construidos**

Una vez identificados los pasos de peces, se realizó su caracterización, registrando el tipo de estructura de paso, diferencia de altura entre entrada y salida, ancho útil, largo, pendiente, profundidad y velocidad del escurrimiento, caudal operacional y finalmente la especie beneficiada. Los pasos de peces encontrados en los proyectos revisados se clasificaron de acuerdo a la figura 2.



**Figura 2. Tipos de pasos para peces**

(Fuente: Elaboración propia, 2017)

### 3.4. Análisis de consistencia

Para realizar el análisis de consistencia en el diseño, de los pasos de peces identificados, se consideraron nueve criterios, siete de los cuales corresponden a requisitos generales que favorecen el buen funcionamiento, según recomendaciones extranjeras. Estos se encuentran directamente influenciados por aspectos hidráulicos. Los dos criterios restantes se encuentran asociados a la especie objetivo. En consecuencia, los criterios quedan agrupados de la siguiente forma:

-Grupo 1: Requisitos generales para los pasos

Posición óptima, entrada y flujo de atracción, condiciones de salida, longitudes, pendiente y piscinas de descanso, mantenimiento, medida para proteger pasos e integración con paisaje.

-Grupo 2: Consideraciones de especie objetivo

Enfoque del diseño a especies Nativas y consideración de capacidad de nado en el diseño del paso.

Finalmente, los proyectos que consideran pasos de peces, son sometidos a evaluación, asignando un valor entre 0 y 1 a cada criterio mencionado, con el fin de establecer una ponderación de su respectivo cumplimiento. Por último, el resultado final se obtendrá mediante dos etapas.

-Primera etapa: Se obtendrá el porcentaje de cumplimiento asociado a cada grupo de criterios

-Segunda etapa: Se obtendrá la ponderación final del proyecto, multiplicando la ponderación de ambos grupos de criterio.

La principal razón del procedimiento en la obtención de los porcentajes finales, se debe a que el diseño de los pasos para peces debe cumplir especialmente con los criterios asociados a la especie objetivo, de lo contrario, el paso será hidráulicamente óptimo, pero la eficiencia de este, en cuanto al total de individuos que logran pasar por el paso, con respecto al total que lo intentan, será baja e incluso nula.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo, se darán a conocer los resultados y análisis obtenidos según cada uno de los objetivos específicos planteados.

### 4.1. Estructuras transversales identificadas

Se identificaron un total de 65 estructuras transversales, distribuidas en 49 proyectos revisados. En la tabla 1 se identifican el tipo y cantidad de estructuras transversales existentes en el país. Estas se encuentran clasificadas según la temporalidad y material de la estructura.

**Tabla 1. Identificación y cuantificación de estructuras transversales de Chile con RCA**

(Fuente: Elaboración propia, 2017)

		Tipo de estructura	Cantidad	% tipo de estructura
		<b>DEFINITIVAS</b>	<b>FIJAS</b>	<b>Tipo terraplén</b>
Earthfill	9			14%
Rockfill	11			17%
<b>Hormigón</b>				
Otros(Alta montaña -tipo sumidero)	5			8%
<b>Subtotal fijas</b>	<b>25</b>			<b>38%</b>
<b>MIXTAS</b>	<b>Tipo terraplén + compuerta</b>			
	Earthfill		4	6%
	Rockfill		3	5%
	<b>Hormigón + compuerta</b>			
	Gravedad		5	8%
	Otros (V.Creaguer+s/clasificación)		5	8%
	Machones		23	35%
	<b>Subtotal mixtas</b>		<b>40</b>	<b>62%</b>
<b>Total de pasos evaluados</b>		<b>65</b>		

De acuerdo a la tabla 1, existe predominancia de estructuras transversales mixtas (62%), es decir, independiente de su materialidad, estas se encuentran preferentemente complementadas con estructuras de manejo hidráulico. Esto se debe principalmente a que las estructuras analizadas, fueron en su mayoría vinculados al sector energético(84%, ANEXO E), las que de acuerdo a su funcionamiento deben manejar el recurso hídrico al momento de su captación, operación y reincorporación al cauce mediante flujo asociado al caudal ecológico.

El resto de las estructuras transversales (excluyendo las de alta montaña), no mencionaron el uso de compuertas, situación que se explica debido a que estas corresponden a estructuras vinculadas al sector agrícola(16%, ANEXO E) y son preferentemente embalses de regulación de caudal, los que buscan acumular el máximo de agua en periodos interanuales. Este tipo de estructura transversales no cuentan directamente con compuertas; sin embargo, estas son dispuestas en otras zonas de la bocatoma asociadas a la captación y distribución de caudal.

En segundo lugar, la tabla 1 da cuenta que la mayor cantidad de estructuras transversales corresponden a las de tipo terraplén y terraplén mixto. Este tipo de estructuras son una alternativa económicamente conveniente, pues generalmente son construidas mediante material excavados del lugar donde se encuentra emplazada la obra.

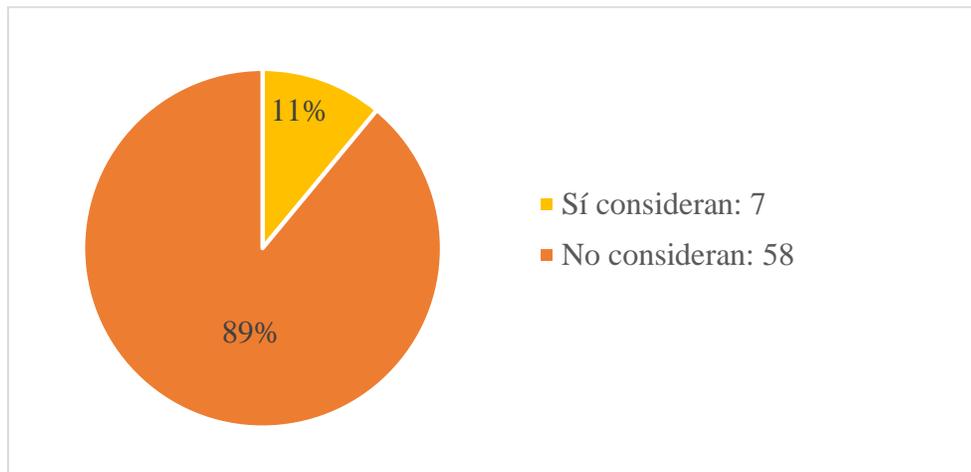
El segundo tipo de estructura transversal predominante corresponde a machones de hormigón complementados con estructuras de manejo hidráulico del tipo compuerta. Esto se debe principalmente a que el diseño de este tipo de estructuras se adapta fácilmente a las condiciones del lugar donde se emplaza la obra, a diferencia de aquellas estructuras tipo terraplén, las que se justifican solo en lugares donde las condiciones mecánicas del suelo permiten su posterior uso como elemento estructural.

Finalmente se observan solo cinco estructuras de hormigón de tipo Gravedad y cinco estructuras tipo vertedero Creager y sin clasificación. Esto se explica al alto costo de este tipo de obras y al complejo desarrollo de los procesos constructivos.

El resumen de las dimensiones respectivas a cada estructura transversal, se muestra en la tabla 2

#### 4.2. Proyectos con pasos para peces

La figura 3 representa en porcentajes la cantidad de estructuras transversales que poseen pasos para peces, con respecto al total de las 65 estructuras transversales revisadas. Se muestra que, hasta la fecha sólo un 11% de las estructuras identificadas poseen pasos para peces. Si bien esta situación es alarmante, se debe analizar bajo el contexto nacional. Una de las razones del bajo número de pasos implementados en Chile, es que esta medida de mitigación no es obligatoria y es más bien una medida de carácter voluntario. A esto se suma el desconocimiento acerca del comportamiento de las especies nativas y sus capacidades natatorias.



**Figura 3. % Estructuras transversales que poseen pasos para peces en Chile.**

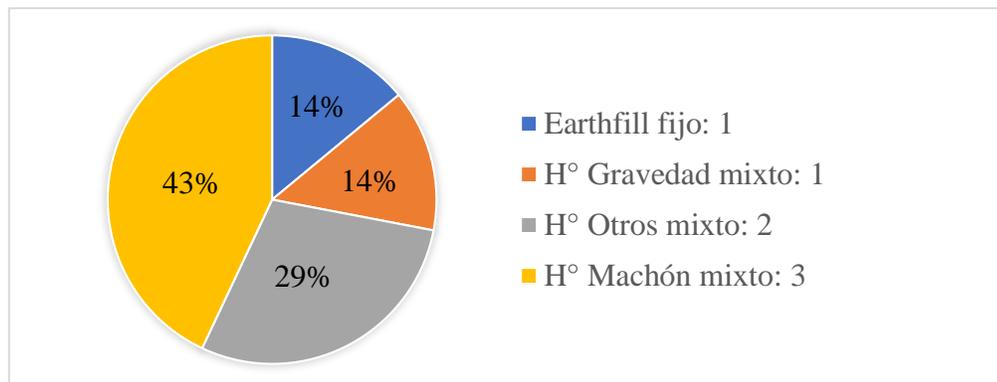
(Fuente: Elaboración propia, 2017)

Según lo observado en ANEXO B, otra razón relevante de la baja presencia de pasos, es que la medida de mitigación más utilizada ante la existencia de una barrera transversal, corresponde a la relocalización y translocación de peces. Esto se debe principalmente a la fácil implementación, bajo costo y aceptación de la medida. Esta se realiza de forma previa a la construcción de la barrera y en algunos casos en fases de operación. Si bien esta medida pudiese resultar muy eficaz en aquellos casos donde los movimientos migratorios de los peces son locales y reducidos, debe realizarse con una periodicidad y tiempo de acción prolongados. En Chile los tiempos de ejecución de esta medida están en el orden de 3 a 5 años (Ver detalles de la medida en ANEXO B).

La consecuencia del bajo número de pasos identificados, se ve reflejada en la rápida disminución de las especies de peces nativos, ya que, si bien todas las estructuras transversales revisadas contaban con medidas de mitigación dirigidas a los impactos asociados a la biota acuática, solo siete de ellas contaban con pasos para peces.

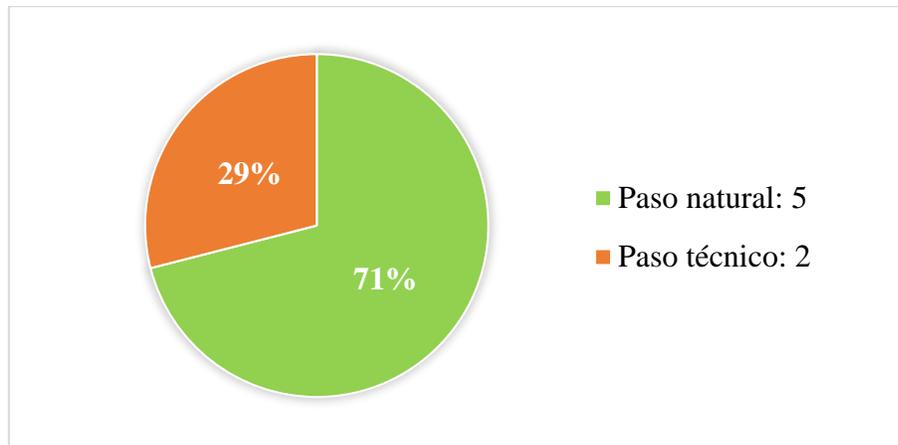
Mientras en Chile, estas medidas de mitigación no dan resultados, la construcción de pasos para peces forma parte de las normativas y exigencias en todos los países de Europa y E.E.U.U, demostrando que un buen diseño, reduce considerablemente el impacto asociado a la fauna íctica.

Finalmente, otro factor asociado al escaso número de pasos para peces, es la relación que existe entre el tipo de paso implementado y la estructura transversal, pues a mayor altura más dificultades existen para propiciar conectividad longitudinal en los cauces intervenidos por medio de un paso. En Chile, los pasos de peces fueron implementados en estructuras transversales de poca altura. La relación que existe entre el tipo de estructura transversal y el paso se muestra en la figura 4. Así, el 43% de los pasos identificados se encuentran ubicados en estructuras transversales de tipo machón mixto. De acuerdo al ANEXO B, estas estructuras no superan los 8,5 m, razón que disminuiría las dificultades en el diseño del paso. De forma contraria, las estructuras transversales de tipo Earthfill y Hormigón de gravedad mixto (que poseen pasos), presentan alturas del orden de los 15 m, lo que explicaría el menor porcentaje obtenido en relación a los otros tipos de estructuras.



**Figura 4. Cuantificación de pasos para peces en Chile, según tipos de estructura transversal**  
(Fuente: Elaboración propia, 2017)

Otro factor importante en el que influye la altura, es el aspecto del paso implementado, pues a menores alturas, existen más posibilidades de desarrollar un paso de tipo natural. De acuerdo a los pesos identificados Chile, estos se clasifican según su aspecto (figura 5).

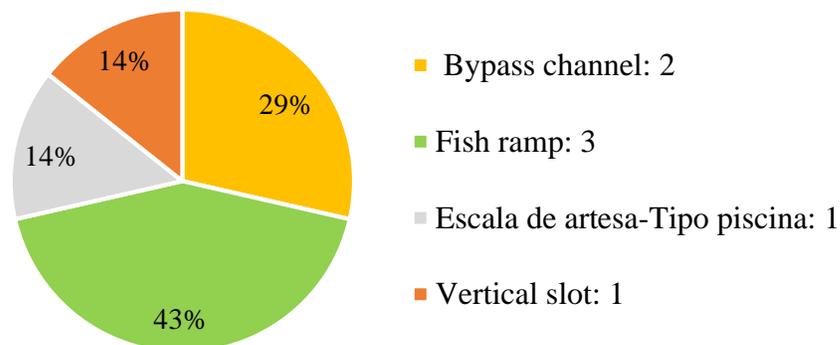


**Figura 5. Clasificación de pasos según aspecto de diseño**

(Fuente: Elaboración propia, 2017)

Este resultado se condice nuevamente con la baja altura de las estructuras transversales en las que se implementaron los pasos (15 m máximo). Esta condición permite desarrollar alternativas naturales, pues admite menores pendientes y velocidades, situación que favorece al movimiento migratorio de los peces. Este resultado es propicio, pues indica que si bien la cantidad de pasos construidos hasta el año 2017 son pocos, existe prioridad en la implementación del tipo de paso natural, lo que beneficia no solo a los movimientos migratorios de los peces, si no también a la conectividad longitudinal del hábitat en todas sus dimensiones.

La figura 6 muestra los tipos de pasos construidos en Chile. En ella se evidencia una clara predominancia de los pasos tipo fish ramp con tres pasos de peces identificados. Estos fueron implementados en las estructuras transversales de menor altura identificadas y junto con el tipo by pass channel forman parte de las alternativas más económicas de todas las implementadas en Chile.



**Figura 6. Identificación de pasos para peces en Chile**

(Fuente: Elaboración propia, 2017)

### 4.3. Características de pasos descritos

La tabla 2 muestra un análisis de la inversión estimada por el tipo de paso implementado en cada proyecto. Cabe destacar que ninguno de estos presentó información respecto a este ámbito, sin embargo, el valor estimado corresponde a una aproximación basada en antecedentes extranjeros (Tecnomia, 2017). Los valores presentados en la tabla 2, poseen las consideraciones necesarias en cuanto a tasas de inflación, por lo que la proporción entre la inversión del fishway y el total invertido se realizó de acuerdo al año en el que se obtuvo la resolución de calificación ambiental.

**Tabla 2. Análisis de inversión de los pasos para peces identificados**

N° de proyecto	Nombre del proyecto	Año	Inversión total \$ US	Inversión estimada Fishway \$US	% de inversión del Fishway
27	Central Hidroeléctrica Laja	2006	25.000.000	312.255	1,25%
5	Embalse Tricao	2008	400.000	S/información	S/información
38	Pequeña Central Hidroeléctrica de Pasada Baquedano	2013	56.300.000	118.062	0,21%
18*	Central de Pasada Mediterráneo	2014	400.000.000	Paso 1: 160.928	0,04%
				Paso 2: 146.418	0,04%
4**	Mini Centrales Hidroeléctricas de Pasada Palmar - Correntoso	2017	20.000.000	Paso 1: 178.101	0,89%
				Paso 2: 30.532	0,15%

\* El proyecto contempla 2 pasos para peces en una misma estructura transversal

\*\* El proyecto contempla 2 pasos para peces, en dos estructuras transversales distintas.

(Fuente: Elaboración propia, 2017)

Estos resultados evidencian el bajo costo que representa la construcción de pasos para peces en relación al total invertido en cada proyecto (menor al 1,25%), considerando incluso que existe una tendencia a disminuir la inversión respectiva al paso. Si se considera que este tipo de medida, es de carácter permanente y representa una solución íntegra hacia las diferentes especies de peces como también al medio acuático, debiera entonces comenzar a evaluarse la exigencia de estos de forma obligatoria mientras sea pertinente.

Las características y los antecedentes reunidos en cada proyecto se muestran en detalle desde la tabla 3 a la 6. Cada una de estas contiene aspectos relacionados a información general del paso y a sus principales parámetros de dimensionamiento.

**Tabla 3. Antecedentes generales de cada paso**

N° del Proyecto	Región	Río	Tipo de estructura de paso	Memoria de cálculo
4**	X Región de los Lagos	Pulelfú y Correntoso	Paso 1: Fish ramp	No
			Paso 1: Fish ramp	No
5	V Región de Valparaíso	Estero Tricao	Bypass channel	No
18*	X Región de los Lagos	Río Manso	Paso 1: Vertical slot	Sí
			Paso 2: Fish ramp	No
27	VIII Región del Bío-Bío	Río Laja	Escala de artesa	No
38	VIII Región del Bío-Bío	Río Cholguán	Bypass channel	No

\* El proyecto contempla 2 pasos para peces en una misma estructura transversal.

\*\* El proyecto contempla 2 pasos para peces, en dos estructuras transversales distintas.

(Fuente: Elaboración propia, 2017)

La presencia de los pasos para peces identificados en Chile, se encuentran ubicados principalmente en la zona centro sur. Todos los proyectos pertenecen a cuencas hidrográficas distintas.

En cuanto a nivel de información entregado, solo un paso presentó memoria de cálculo.

Con respecto al proyecto 4, se complementa además que la información se obtuvo mediante el estudio de planos e imágenes encontradas en antecedentes y presentadas en ANEXO C, por lo que valores de pendientes y velocidades presentados en la tabla 4, son solo estimaciones.

El proyecto 5, realizó cambios en la medida de mitigación inicial, ya que, en primera instancia hacía mención de un paso de peces dispuesto en una tubería. Sin embargo, de acuerdo a las recomendaciones realizadas al EIA, se consideró un canal de desvío con características naturales similar a Bypass channel. No obstante, es bastante básica la información y está orientada principalmente a la derivación del caudal ecológico.

Los proyectos 18 y 38, fueron los mas completos en cuanto a la cantidad de antecedentes encontrados, presentando un buen nivel de detalle en cuanto planos y descripción del paso.

Finalmente, el proyecto 27 mostró un claro interés por las especies nativas del lugar. Sin embargo, el nivel de detalle del paso fue muy reducido y no permitió caracterizar de forma completa el paso. Solo presento planos conceptuales.

**Tabla 4. Características de pasos para peces identificados**

N° del Proyecto	Altura (m)	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Pendiente (%)	Velocidad (m/s)	Q(m <sup>3</sup> /s)	
							Ecológico	Operacional
4.1	7	30	1	0,6	23,3 <sup>(1)</sup>	0,46 <sup>(2)</sup>	0,276	x
4.2	1,2	42,8	2,4	0,4	3 <sup>(1)</sup>	0,46 <sup>(2)</sup>	0,44	x
5	S/I <sup>(3)</sup>	1000	S/I	S/I	S/I	S/I	0,0173	x
18.1	5,56	65	1,4	0,7	9	2	0,2	x
18.2	6,071	28	4	1,568	20	S/I	13,2	x
27	13,5	175	1,5	S/I	7,7	S/I	S/I	x
38Tramo1	0,09	23,6	1,5	0,55	0,4	1,84	1,51	x
38Tramo2	1,39	69,4	2,5	0,62	2	0,97		
38Tramo3	4,16	20,8	1,6	S/I	20	S/I		

Obs. 1: La numeración de proyecto 4.1 y 4.2 pertenecen al proyecto N°4 y representan dos pasos implementados en dos estructuras transversales diferentes.

Obs. 2: La numeración de proyecto 18.1 y 18.2 pertenecen al proyecto N°18 y representan dos pasos implementados en una misma estructura transversal.

(1) Pendiente estimada: Altura/Longitud

(2) Velocidad estimada: Q/A

(3) S/I: Sin información

X: Existe y corresponde al caudal ecológico mostrado.

(Fuente: Elaboración propia, 2017)

**Tabla 5. Dimensiones de estructuras transversales, asociadas a los pasos para peces en Chile**

N° del Proyecto	Altura (m)	Longitud de coronamiento (m)
4*	2 - 3,10	20-25
	1,5-2,5	18-25
5	14	130
18	8,5	12
27	15	71,5
38	8,5	41,3

\* El proyecto contempla dos estructuras transversales.

(Fuente: Elaboración propia, 2017)

Respecto a los resultados mostrados en la tabla 4 y 5, las dimensiones de los pasos, se encuentran condicionados al tamaño de las respectivas estructuras transversales y en general no presentan relación entre pasos de un mismo tipo, esto se debe a que a cada proyecto contempla diferentes requerimientos. Del punto de vista hidráulico todos los pasos identificados operaban con los respectivos caudales ecológicos asignado a cada proyecto.

**Tabla 6. Especie considerada en el diseño según proyecto**

N° del Proyecto	Año de calificación	Especie considerada en el diseño
27	2006	Nota: No presentó estudios que verificaran el correcto funcionamiento para estas especies, sin embargo, existía noción de priorizar las especies nativas.
5	2008	Cheirodon pisclus (Especie nativa) Basilichthys australis (Especie nativa)
38	2013	Diplomystes nahuelbutaensis (Especie nativa) Bullockia maldonadoi (Especie nativa)
18.1	2014	Oncorhynchus kisutch (Especie introducida) Oncorhynchus mykiss (Especie introducida)
18.2	2014	Oncorhynchus kisutch (Especie introducida) Oncorhynchus mykiss (Especie introducida)
4.1	2017	Oncorhynchus mykiss (Especie introducida) Galaxia maculatus (Especie nativa)
4.2	2017	Oncorhynchus mykiss (Especie introducida) Galaxia maculatus (Especie nativa)

(Fuente: Elaboración propia, 2017)

Con respecto a las consideraciones de especies nativas en el diseño, mostradas en la tabla 6, no se evidenció una tendencia clara en su prioridad. De igual manera no existe una evolución positiva en cuanto a al enfoque del diseño hacia especies nativas.

#### 4.4. Análisis de consistencia

En la tabla 7 se muestran los resultados del análisis de consistencia entre el diseño del paso y la especie beneficiada.

**Tabla 7. Análisis de consistencia entre el diseño del paso y la especie beneficiada**

(Fuente: Elaboración propia, 2017)

Año de calificación	Nombre del Proyecto		Grupo 1	Grupo 2	Evaluación del paso
			% de cumplimiento grupo de criterios 1	% de cumplimiento grupo de criterios 2	% de cumplimiento del paso
2006	Central Hidroeléctrica Laja		50%	50%	25%
2008	Embalse Tricao		43%	50%	21%
2013	P.C.H. de Pasada Baquedano		80%	50%	40%
2014	Central de Pasada Mediterráneo	Paso 1	88%	50%	44%
		Paso 2	74%	0%	0%
2017	M.C.H. de Pasada Palmar - Correntoso	Paso 1	79%	25%	20%
		Paso 2	79%	25%	20%

##### a) Análisis de aspectos hidráulicos

En proyecto con mayor cumplimiento, se debe a que solo presentó falencias en cuanto a su posición, entrada y flujo de atracción del paso. Si bien el paso 2 del mismo proyecto, presentó errores similares, mostró además una agravante al no cumplir con los criterios de longitudes, pendiente y piscinas de descanso, lo que se reflejó en su evaluación.

En cuanto a los proyectos que poseen el 79% y el 80% de cumplimiento, no obtienen el máximo valor, debido a falencias observadas en su posición, entrada y flujo de atracción; longitudes, pendientes y zonas de descanso.

Los dos proyectos con desempeño intermedio, se debe al no cumplimiento de criterios asociados a la posición óptima del paso, entrada y flujo de atracción, salida, longitudes, pendiente y zonas de descanso.

Todos los proyectos cumplen adecuadamente con correcto mantenimiento, medida para proteger pasos e integración con el paisaje.

b) Análisis de especie objetivo utilizada

Los 4 proyectos que alcanzan un 50% de cumplimiento, se debe a que, si bien todos consideran especies nativas, el diseño de pasos no contempla consideraciones de las capacidades de nado.

En el caso del proyecto con 25 % del cumplimiento, solo una de las dos especies beneficiadas por el paso es nativa y la otra especie es introducida. En ambos casos no presenta estudios asociados a la capacidad de nado.

Finalmente, el proyecto, se debe a la ausencia de los criterios asociados a las consideraciones de especies nativas y sus respectivas capacidades de nado.

c) Evaluación Final del paso

En cuanto a los aspectos hidráulicos, la evolución del diseño mostró claras mejoras alcanzando porcentajes de cumplimiento del orden de 80%. No obstante, el enfoque del diseño respecto a las especies nativas, presento una disminución en el tiempo. En general, todos los proyectos muestran una reducción en sus porcentajes de evaluación final, ya que como se mencionó anteriormente, el diseño de los pasos para peces debe cumplir especialmente con los criterios asociados a la especie objetivo. De no ser así, el paso será hidráulicamente óptimo, pero su eficiencia en cuanto al total de individuos que logran atravesar el paso, respecto al total que lo intentan, será baja e incluso nula.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Las estructuras transversales que cuentan con RCA para uso energético, presentan mayor predominancia con respecto a las de uso agrícola. Como consecuencia y en concordancia a lo anterior, se identifica una mayor proporción de estructuras transversales de categoría definitivas mixtas. Presentan una leve tendencia a ser construidas de hormigón, lo que se condice con la adaptabilidad que ofrecen este tipo de materiales, con respecto a las condiciones del lugar donde se desarrolla la obra. De acuerdo a lo anterior la modalidad de estructura transversal, con mayor presencia en Chile, corresponde a las de tipo machón mixto.

Hasta la fecha, en Chile existe un bajo número de pasos para peces implementados en el país. No obstante, a partir del año 2006, esta medida comienza a formar parte las alternativas de mitigación de impacto ambiental asociadas a la fauna íctica. La mayor parte de los pasos para peces identificados, se encuentran implementados en estructuras transversales de tipo machón mixto, mostrando una clara tendencia a ser diseñados en la modalidad de pasos de tipo natural. De acuerdo a esto, el paso con mayor presencia hasta ahora, corresponde al Fish ramp.

Los pasos identificados, se encuentran condicionados por las dimensiones de las estructuras transversales a las que se encuentran asociados, y en general no presentan relación entre los pasos para peces de un mismo tipo. Del punto de vista hidráulico todos los pasos identificados operaban con los respectivos caudales ecológicos asignado a cada proyecto.

El análisis de consistencia entre el diseño del paso y las especies consideradas, indica que en general los pasos identificados poseen falencias importantes relacionadas a aspectos que aseguran el buen funcionamiento hidráulico. Estos corresponden principalmente a su posición, entrada y salida del paso; flujo de atracción, longitudes, pendiente y zonas de descanso. Con respecto a las consideraciones de especies nativas en el diseño, no se evidenció una tendencia clara en cuanto a su prioridad. En relación a esto, el principal error evidenciado, fue la inexistencia de información relacionada a las capacidades de nado de la especie considerada en el diseño.

En general, las características y criterios de diseño de los pasos implementados en Chile, se han desarrollado bajo el desconocimiento de aspectos fundamentales relacionadas a las condiciones sitio específicas del lugar donde se construyen los pasos. Si bien los proyectos que implementaron

pasos para peces, mostraron un esfuerzo válido y digno de imitar, a futuro, estos deben estar respaldado por los fundamentos necesarios, que aseguren el real funcionamiento del paso.

## **5.2 Recomendaciones**

De acuerdo a lo concluido en esta investigación, es necesario incentivar estudios que profundicen el conocimiento acerca de los rasgos específicos de los peces nativos, enfatizando en aspectos relacionados a la capacidad de nado y comportamientos migratorios de estas especies. De esta forma es posible garantizar que los futuros paso implementados serán diseñados, bajo parámetros cercanos a la realidad nacional.

Una vez teniendo claro las reales facultades de las especies nativas, se deben mejorar las exigencias y normativas aplicadas hasta ahora, definiendo claramente aquellos casos en que la implementación del paso para peces recibirá un carácter obligatorio, recomendable o prohibido. Además, es necesario mejorar el nivel de detalle de la información referida al paso, exigiendo planos y memorias de cálculo que garanticen un buen planteamiento del diseño.

De acuerdo al futuro energético del país, asociado a la construcción de nuevas centrales de pasada, es pertinente recomendar la implementación de pasos, perfectamente aplicables a las condiciones de baja altura de este tipo de centrales. Mostrándolo como una alternativa válida no solo para facilitar los movimientos migratorios de los peces, sino también como una forma de otorgar conectividad al hábitat intervenido en todas sus dimensiones.

## REFERENCIAS

- Bell and Milo (1990). *Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Criteria*. 2nd ed. Portland, Oregon.
- Clay and Charles (1995). *Design of Fishways and Other Fish Facilities*. 2nd ed. Florida.: Lewis Publishers
- Cowx, I. and Welcomme, R. (1998). *Rehabilitation of rivers for fish*. Oxford: Published by arrangement with the Food and Agriculture Organization of the United Nations by Fishing News Books.
- Gajardo, Beristain, Ryman and Laikre. (2003). *Exploitation and Management of Exotic and Naturalized Aquatic Genetic Resources in Relation to Native Biodiversity*. 1st ed. Minnesota, USA.
- García and Lancaster (2006). Aquatic Habitat Modeling of Chilean Native Fish in a Reach of *the Biobío River*.. 1st ed. Boise, Idaho.: M.S. Thesis.
- Goodwin, P., Jorde, K., Meier, C. and Parra, O. (2006). Minimizing environmental impacts of hydropower development: transferring lessons from past projects to a proposed strategy for Chile. *Journal of Hydroinformatics*, 08(4), p.253.
- Habit, e., Belk, m., Cary Tuckfield, R. and PARRA, O. (2006). Response of the fish community to human-induced changes in the Biobio River in Chile. *Freshwater Biology*, 51(1), pp.1-11.
- Ibáñez, G. and Sepúlveda, J. (2010). *Manual de Procedimientos para el Rescate, Translocación, Mantención Temporal y Liberación de Especies Hidrobiológicas*. 1st ed. Valparaiso, Chile.
- Larinier, Marmulla. (2001). Environmental issues, dams, and fish migration. In: *Dams, Fish, and Fisheries: Opportunities, Challenges, and Conflict Resolution*, pp. 45-90. FAO, Roma.
- Legislación Chilena (2010). *Aprueba ley sobre bases generales del medio ambiente*. Ley 19300. Ministerio de Medio Ambiente, Chile.
- Legislación Chilena (2014). *Aprueba reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental*. Decreto supremo 40. Ministerio de Medio Ambiente, Chile.
- Link, O. and Habit, E. (2014). Requirements and boundary conditions for fish passes of non-sport fish species based on Chilean experiences. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 14(1), pp.9-21.

- Marmulla, G. and Welcomme, R. (2002). *Fish passes*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations in arrangement with DVWK.
- Meier, C. (2007). *Paso de Peces en Centrales Hidroeléctricas: Aproximaciones para el caso chileno*. Concepción, Chile.
- Meier, C. (2011). *Hidroelectricidad realmente sustentable para Chile*. Chile.
- Ministerio de Energía (2014). *Agenda de energía Un desafío país, progreso para todos*. Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (2009). *Guías de reconocimiento de obras tipo y de procedimientos*. Chile: Aquaterra ingenieros.
- Nanson, G. and Croke, J. (1992). A genetic classification of floodplains. *Geomorphology*, 4(6), pp.459-486.
- Novak, P. (2010). *Hydraulic structures*. London [u.a.]: Taylor & Francis.
- Odeh, (1999). *Innovations in Fish Passage Technology*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.
- Odeh, (1999). *A summary of environmentally friendly turbine design concepts*. DOE/ID/13741, US Department of Energy, Idaho Operations Office.
- Orsborn and Powers. (1986) *Fishways – An Assessment of their Development and Design*. US Department of Energy, Bonneville Power Administration, Division of Fish and Wildlife.
- OTA. (1995) *Fish Passage Technologies: Protection at Hydropower Facilities*. Report OTA-ENV-641, Office of Technology Assessment, Congress of the United States, Washington, D.C.
- Sanz Ronda, Saiz Rojo, Martínez de Azagra and Navarro Hevia (2006). *Soluciones al problema de la migración de los peces en la cuenca del Nela*.
- Sea.gob.cl. (2017). SEA Chile. [online] Available at: <http://www.sea.gob.cl> [Accessed Aug. 2017].
- SIC. (2017). Aplicación de Coordinador eléctrico nacional.
- Tecnomia (2017). *Pasos de peces para permeabilizar estructuras transversales en la cuenca del Ebro*. 1st ed. España: Pedro Boné Puyo.
- Travade, M. Larinier, S. Boyer-Bernard and J. Dartiguelongue. (1998). *Fish migration and fish bypasses*. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd. Publisher.
- Vila, L. Fuentes and M. Contreras. (1999). Peces límnicos de Chile. *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural, Chile*, 48: 61-75.

## **ANEXOS**

**ANEXO A: Listado de proyectos revisados**

**ANEXO B: Generalidades de proyectos e identificación de estructuras transversales**

**ANEXO C: Antecedentes y características de pasos para peces identificados**

**ANEXO D: Consistencia entre diseño y especie beneficiada**

**ANEXO E: Resultados objetivos específicos**