

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	viii
SUMMARY	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 Planteamiento del problema	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Creciente demanda del agua, problemática mundial y chilena	3
2.2. Estructura y funcionamiento de ecosistemas lóticos	4
2.2.1. Complejidad	5
2.2.2. Flujo hidrológico y funcionalidad.....	11
2.2.3. Relaciones intersistémicas y funcionalidad	15
2.3. Efectos causados por grandes embalses	15
2.4. Origen del concepto caudal ecológico	20
2.5. Conservación a nivel ecosistémico	22
3. OBJETIVOS	24
3.1. Objetivo general	24
3.2. Objetivos específicos.....	24
4. HIPOTESIS	25
5. MATERIALES y MÉTODOS.....	26
5.1. Evaluación de los conceptos de caudal ecológico.....	26
5.2. Evaluación de metodologías para la determinación del caudal ecológico	27
5.3. Evaluación de la aplicación de un caudal ecológico en Chile	29
6. RESULTADOS.....	32
6.1. Conceptos de caudal ecológico.....	32
6.1.1. Caudal ecológico (<i>instream flow</i>) en Washington	32
6.1.2. Caudal ecológico (<i>débits réservés écologiques</i>) en Québec.....	33
6.1.3. Caudal ecológico (<i>vazão ecológica</i>) en Brasil.....	34
6.1.4. Caudal ecológico en Chile	35
6.2. Evaluación de los conceptos de caudal ecológico.....	36

6.3.	Descripción de métodos para la determinación de un caudal ecológico ..	41
6.4.	Evaluación de métodos para la estimación de un caudal ecológico.....	44
6.4.1.	Evaluación de métodos hidrológicos.....	44
6.4.2.	Evaluación de métodos hidráulicos.....	46
6.4.3.	Evaluación de métodos de simulación de hábitat	47
6.4.4.	Evaluación de métodos holísticos.....	48
6.5.	Aplicación del concepto de caudal ecológico en Chile.....	51
6.6.	Estudios encomendados por DGA.....	51
6.6.1.	Estudio 1- Caudales ecológicos en Regiones IV, V y Metropolitana	51
6.6.2.	Estudio 2- Caudales ecológicos: Caracterización Hidroambiental Etapa I	54
6.6.3.	Estudio 3- Análisis de Criterios Hidroambientales en el Manejo de Recursos Hídricos: Pautas para la determinación de caudales ecológicos	55
6.6.4.	Estudio 4- Análisis de Criterios Hidroambientales en el Manejo de Recursos Hídricos: Diseño de Plan de Monitoreo para la determinación de caudales ecológicos.....	57
6.6.5.	Estudio 5- Análisis de Criterios Hidroambientales en el Manejo de Recursos Hídricos: Monitoreo de una cuenca piloto para la determinación de caudales ecológicos.....	57
6.6.6.	Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos.....	59
6.7.	Evaluación de los estudios encargados por DGA en Chile para estimar caudales ecológicos.....	60
6.8.	Estimación de caudales ecológicos en Estudios de Impacto Ambiental de Chile.....	66
6.8.1.	Central Hidroeléctrica Lago Atravesado y caudal ecológico.....	66
6.8.2.	Embalse Corrales y caudal ecológico	67
6.8.3.	Central Hidroeléctrica Quilleco y caudal ecológico	69
6.8.4.	Embalse Illapel y caudal ecológico	72
6.8.5.	Proyecto Hidroeléctrico La Higuera y caudal ecológico	73
6.8.6.	Central Hidroeléctrica Río Licán y caudal ecológico	76

6.8.7.	Convento Viejo Etapa II y caudal ecológico	77
6.9.	Evaluación del proceso de estimación de caudales ecológicos en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental	78
6.10.	Seguimiento en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.....	86
7.	DISCUSIÓN.....	88
7.1.	Supuestos implícitos en la gestión de las aguas asociados al caudal ecológico.....	88
7.2.	Discusión sobre los resultados	89
7.3.	Análisis de la hipótesis.....	91
7.4.	Problemas de gestión de las aguas y sus consecuencias en los ecosistemas lóticos.....	93
7.5.	Propuesta de gestión relacionadas al concepto de caudal ecológico ...	94
8	BIBLIOGRAFÍA.....	101
9.	ANEXO 1	106
	A.1 Métodos hidrológicos	106
A.1.1	Método de Curva de Permanencia.....	106
A.1.2	Método de Tennant o Montana	107
A.1.3	Método del caudal mínimo de 7 días con período de ocurrencia de 10 años ($7Q_{10}$).....	108
A.1.4	Métodos europeos	109
A.1.5	Método “Range of Variability Approach” (Aproximación por Rangos de Variabilidad).....	111
	A.2 Métodos hidráulicos.....	115
A.2.1	Método del Perímetro Mojado.....	115
	A.3 Métodos de simulación de hábitat	116
A.3.1	Método de Instream Flow Incremental (IFIM).....	116
	A.4 Métodos holísticos	118
A.4.1	Método de Building Block (BBM) ~ aproximación bottom -up.....	119
A.4.2	Método de Benchmarking ~ aproximación top-down.....	124
10.	ANEXO 2.....	125

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Demanda actual del agua en Chile. Fuente: DGA, 1999.....	4
Figura 2. Modelo de ecosistema.....	4
Figura 3. Modelo de la estructura de los ecosistemas lóticos de acuerdo el flujo de carbono.....	7
Figura 4. Modelo teórico de la influencia del régimen hídrico sobre los patrones y procesos ecológicos.....	13
Figura 5. Modificación del régimen natural por los embalses.....	17
Figura 6. Aproximaciones de conservación.....	22
Figura 7. Relación caudal –área utilizable ponderada para tres especies de peces en brazo sur de Río Laja.....	71
Figura 8. Componentes de un ecosistema lótico.....	95
Figura 9. Representación del comportamiento del caudal “natural” y del caudal ecológico propuesto.....	98
Figura 10. Niveles de toma de decisión	99
Figura A I. Curva de Permanencia.....	107
Figura A II. Valores de caudal máximo de un día para cada año en el río Roanoke antes y después instalado un embalse.	113
Figura A III. Relación entre caudal y perímetro mojado.....	116
Figura A IV. Esquema de pasos metodológicos para IFIM.....	117

Figura A V. Curvas de índices de habitabilidad (iah) para la especie <i>Astyanax aff.taeniatus</i> en el río Santa Maria da Vitória y Curva de Área Utilizable Ponderada vs. Caudal.....	118
Figura A VI. Características del flujo hídrico.	123
Figura A VII. Bloques hipotéticos. Requerimientos de Flujo (IFR) usando el método Building Block	123

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Componentes de ecosistemas lóticos en función del carbono	8
Tabla 2. Funciones ecológicas de diferentes niveles de caudal	14
Tabla 3. Respuestas ecológicas a la alteración de los elementos del régimen hídrico.	19
Tabla 4. Comparación de conceptos de caudal ecológico en distintos estados o países	36
Tabla 5. Evaluación de los conceptos de caudal ecológico.....	40
Tabla 6. Comparación de métodos para determinar un caudal ecológico en relación a aspectos ecológicos.....	43
Tabla 7. Comparación de métodos para determinar un caudal	43
Tabla 8. Evaluación de distintos tipos de métodos para determinar un caudal ecológico	50
Tabla 9. Indicadores utilizados para la determinación de un caudal ecológico.....	53
Tabla 10. Estudios encomendados por DGA para la determinación de un caudal ecológico en la instancia de otorga de nuevos derechos de agua.....	63
Tabla 11. Evaluación de los conceptos de caudal ecológico en estudios encomendados por DGA.....	64
Tabla 12. Evaluación de las metodologías propuestas en estudios encomendados por DGA.....	65
Tabla 13. Estimación de caudales biológicos y ambientales (m^3/s) para el río Choapa aguas arriba Junta río Illapel	68
Tabla 14. Caudales ecológicos mensuales, Proyecto Embalse Corrales	69

Tabla 15. Caudales ecológicos anuales aceptados por DGA para Central Hidroeléctrica Quilleco.....	72
Tabla 16. Caudales ecológicos definidos a pie del Embalse Illapel.....	73
Tabla 17. Caudales ecológicos anuales (m ³ /s) estimados según distintas metodologías. Proyecto Hidroeléctrico La Higuera.....	74
Tabla 18. Caudales ecológicos anuales (m ³ /s) estimados a partir de la ponderación de tres metodologías (caso b). Proyecto Hidroeléctrico La Higuera	75
Tabla 19. Caudales ecológicos anuales aceptados por DGA para Proyecto Hidroeléctrico La Higuera.....	76
Tabla 20. Contexto donde se inserta el concepto de caudal ecológico en el SEIA.....	81
Tabla 21. Métodos utilizados para determinar un caudal ecológico por proyectos ingresados al SEIA en Chile desde 1998	83
Tabla 22. Evaluación de conceptos de caudal ecológico en SEIA de Chile	84
Tabla 23. Evaluación de métodos para la determinación de un caudal ecológico dentro del SEIA en Chile.....	85
Tabla 24. Seguimiento de proyectos sometidos al SEIA que han estimado un caudal ecológico.....	87
Tabla 25 Información hidrológica requerida para estimar un caudal ecológico	97
Tabla A I. Estados de conservación de los ríos de acuerdo a Caudal Anual Mensual	108
Tabla A II Caudal residual según Norma Suiza.....	110
Tabla A III. Parámetros hidrológicos utilizados para definir los indicadores de alteración hidrológica en método RVA.....	114

RESUMEN

Se ha introducido a nivel mundial y en Chile el concepto de caudal ecológico en medidas o normas preventivas para conservar los ecosistemas lóticos frente a la alteración del régimen hídrico producida principalmente por embalses. Sin embargo, no se había estudiado hasta ahora cuán efectivo podía resultar este concepto y su aplicación en la gestión de las aguas en Chile. Por lo tanto, el propósito de este trabajo fue evaluar (en base a criterios ecológicos establecidos) si el caudal ecológico tal como ha sido conceptualizado y aplicado contribuye en la conservación de los ecosistemas lóticos. En base a esta evaluación, se observa que a nivel mundial (incluyendo Chile) se piensa que tan solo un caudal mínimo de agua dentro del cauce puede servir para mantener la funcionalidad del ecosistema, sin considerar la importancia de la variabilidad “natural” del régimen hidrológico y la relevancia de mantener un flujo de entrada de energía al sistema (o los aportes de materia orgánica proveniente de la vegetación de la ribera). Por otra parte, se considera a la columna de agua como un factor que afecta a las poblaciones de organismos, a pesar que bajo una concepción de sistemas debe considerarse esta columna de agua, así como a los organismos y a los sedimentos como componentes del ecosistema lótico, los cuales se relacionan complejamente. En tanto, la mayoría de los métodos utilizados a nivel mundial para cuantificar un caudal ecológico estiman caudales mínimos constantes según las probabilidades de ocurrencia de ciertos eventos de sequía, bajo criterios únicamente hidrológicos y en ciertas ocasiones basados solo en estudios sobre la respuesta caudal / tamaño de poblaciones de peces objetivos. En específico en Chile, gestores utilizan métodos hidrológicos simples para estimar un caudal mínimo constante durante todo el año que no debe ser otorgado para su aprovechamiento. En el caso particular de proyectos de embalses en Chile, se han propuesto caudales ecológicos en base a estudios de poblaciones específicas (cuando se realizan) y no se ha considerado mantener un flujo de entrada de energía al sistema. Finalmente, en este trabajo se presenta una propuesta de cómo debe conceptualizarse un caudal ecológico y ser aplicado en nuestro país para contribuir de forma efectiva en la conservación de los ecosistemas lóticos.

SUMMARY

Due to the changes in the natural hydrological regime caused by large dams, it has been proposed to maintain an ecological instream flow in the impacted streams. This flow is defined as the amount of water necessary to meet ecological conservation goals. Nevertheless, it had not been studied yet if those goals could be attained in our country. For this reason this research main purpose is to determine if the instream flow concept, as defined and applied in Chile contributes to the lotic ecosystems conservation. The results of this evaluations shows that: 1) the managers frequently believe that low flows in rivers are the primary constrains on the health of aquatic communities, thus underestimating the importance of the natural flow variability and the inputs coming from the riparian vegetation; 2) most of the methodologies used around the world estimate a constant instream flow based on the occurrence probability of dry episodes and use only hydrological criterion; 3) there are some methodologies that are based on the study of the relation between water flow and fish populations, but very few study the relationship between water flow and the functionality of the lotic ecosystem; 4) in Chile the water managers use only hydrological methodologies to estimate an instream flow; and 5) for dam construction projects in Chile, it has usually been planned to maintain a constant instream flow based only on fish populations studies (when such studies do exist). Finally, this research proposes diverse recommendations to be applied in Chile in order to conserve lotic ecosystems.

1. INTRODUCCIÓN

El funcionamiento de numerosos embalses para el regadío de zonas agrícolas y las centrales hidroeléctricas, así como la creciente demanda de agua para otros propósitos industriales y domésticos, ha generado una importante alteración en el régimen hidrológico natural de los ríos. Esto finalmente ha producido cambios en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas lóticos¹ (Beattie, 2002; Postel y Richter, 2003).

Frente a esta problemática, a principio de los años setenta se propuso una medida preventiva denominada “instream flow” que obliga a mantener un flujo mínimo dentro del río, principalmente para conservar poblaciones de peces o para asegurar usos ambientales como la recreación y la pesca (Lamb, 1995).

Se consideraba entonces que el flujo mínimo era el factor limitante para las poblaciones acuáticas y se pensaba que mientras más agua se mantuviera durante periodos de flujos bajos mejor sería la “salud” de los ríos. Bajo esta perspectiva, las instituciones gubernamentales de Chile encargadas del manejo ambiental de las aguas han adoptado el concepto clásico de caudal ecológico para conservar otras entidades ecológicas como ecosistemas y paisajes. Específicamente CONAMA a partir de 1998 exige a nuevos proyectos hidroeléctricos y de construcción de embalses sometidos al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental que mantengan un caudal ecológico durante su funcionamiento para conservar los ecosistemas aguas debajo de la presa.

Sin embargo, actualmente se ha estudiado la importancia de mantener una cierta variabilidad del flujo hídrico y que distintos rangos de magnitud de volúmenes de agua con una cierta temporalidad son esenciales para el desarrollo del ecosistema. Por ejemplo, se ha estudiado que flujos de magnitud alta moldean las características físicas de los cauces y determinan el tamaño de los substratos de fondo. Otros flujos aún

¹ Se denominan ecosistemas lóticos aquellos sistemas de cuerpos de agua con corrientes rápidas como ríos y arroyos.

mayores (o de inundación) mantienen zonas riparianas²; incluso magnitudes extremadamente bajas pueden jugar un rol importante en la eliminación de especies introducidas (Poff et al., 1997).

También, se reconoce que no solo es necesario mantener una cierta variabilidad del flujo hídrico en un río para permitir la conservación de los mismos, si no también es esencial la mantención de la entrada de energía en el sistema en forma de materia orgánica proveniente de la vegetación que bordea el río (vegetación ripariana) (Stanley et al., 1991).

Por otra parte, los métodos existentes para determinar un caudal ecológico también fueron diseñados bajo antiguas visiones y en su mayoría en función de observaciones y estudios de poblaciones específicas de peces. Por esta razón en el ámbito científico han sido fuertemente criticadas muchas de estas aproximaciones metodológicas (Richter et al., 1996; Poff e tal., 1997; Arthington et al., 1998; Bragg et al., 1999; Alves y Bernardo, 2000 y Tharme, 2002).

1.2 Planteamiento del problema

El concepto de caudal ecológico, se ha introducido a nivel mundial y en Chile en medidas o normas preventivas para conservar los ecosistemas acuáticos frente a las alteraciones del régimen hídrico producidas principalmente por embalses. Sin embargo, existe la incógnita sobre cuán efectivo pueda resultar este concepto y su aplicación en la gestión de las aguas. Por lo tanto, el propósito de este trabajo es evaluar si el caudal ecológico tal como ha sido conceptualizado y aplicado contribuye a la conservación de los ecosistemas lóticos.

² Las zonas riparianas son aquellas áreas de interacción directa entre los sistemas acuáticos y terrestres (Stanley et al., 1991)

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Creciente demanda del agua, problemática mundial y chilena

Se ha evidenciado un aumento de la población mundial la cual exige o depende cada vez más de los recursos naturales. El agua, recurso indispensable para la vida y para la mantención de los ecosistemas acuáticos no escapa de esta realidad. Su demanda crece día a día para cumplir con diversos servicios como lo son: la provisión de agua para el consumo humano, la irrigación de campos agrícolas, la utilización para procesos industriales, la dilución de contaminantes, la mantención de la fertilidad de los suelos, la regulación de la salinidad de zonas costeras así como también ofrece servicios de recreación y navegación. Por esta razón, su escasez en muchas partes del mundo forma parte de problemáticas vitales a resolver con el apoyo de organismos internacionales (Postel y Richter 2003).

Particularmente en Chile, tanto la zona norte como central del país presentan este problema de escasez, donde ocasionalmente las demandas superan la cantidad de agua disponible. Además, en todo el país la mayor parte de los caudales disponibles han sido otorgados para su uso a privados (Universidad de Chile, 1999; DGA y otras instituciones, 2003). De acuerdo a estudios de la DGA, el uso del agua en el país alcanza un valor aproximado a los 2000 m³/s de caudal continuo, de los cuales el 67.8% son demandados para usos hidroeléctricos (uso denominado no consuntivo, puesto que el agua es restituida a su cauce) mientras que el 32.2 % restante a usos consuntivos como el regadío (27, 2%), los usos mineros e industriales representando el 3,5% y el uso doméstico equivalente al 1.5% del total (DGA, 1999) (figura 1).

Esta alta demanda mundial para satisfacer necesidades humanas aunado al problema de contaminación de las aguas (que en nuestro país persiste), se ve confrontada a la necesidad o al deseo de mantener o de permitir el desarrollo de los ecosistemas lóticos (DGA, 1999 y Poff y Hart, 2002).

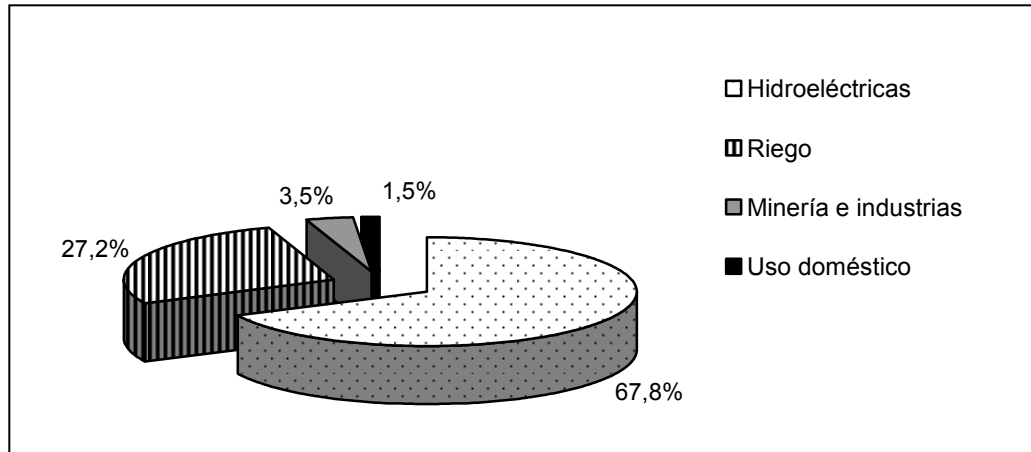


Figura 1. Demanda actual del agua en Chile.

Fuente: DGA, 1999.

2.2. Estructura y funcionamiento de ecosistemas lóticos

Para los efectos de esta investigación, los ecosistemas son sistemas abiertos, esto es, experimentan entradas y salidas constantes de materia, aunque las funciones básicas pueden permanecer constantes por largos períodos de tiempo (Odum y Sarmientos, 1998). Los ecosistemas son representados en modelos donde se destaca el ambiente externo, el cual se considera como parte integral del concepto mismo de ecosistema. En la figura 2 se muestra un modelo del ecosistema, destacando posibles fuentes de energía de entrada.

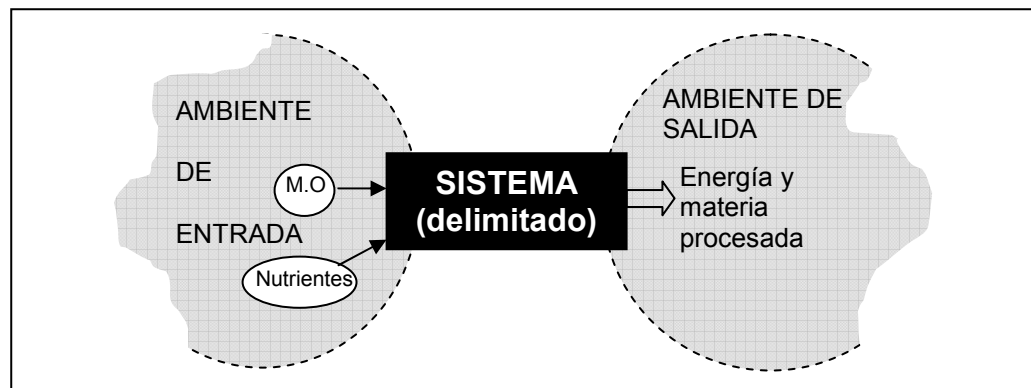


Figura 2. Modelo de ecosistema

Fuente: Odum y Sarmiento, 1998

Los ecosistemas se encuentran constituidos por componentes bióticos y abióticos entre los cuales existen interacciones que permiten modificarse mutuamente. La relación entre estos componentes implica el flujo de materiales y energía. La organización del ecosistema está dada por el número y tamaño de los componentes que lo constituyen y la magnitud de los flujos generados entre ellos. Entre los componentes bióticos se encuentran los de tipo autótrofo y heterótrofo. Los primeros son capaces de fijar energía luminosa y producir alimentos a partir de sustancias inorgánicas simples gracias al proceso de fotosíntesis. Mientras, los componentes heterótrofos, utilizan, redistribuyen y descomponen las materias complejas sintetizadas por los autótrofos (Odum y Sarmientos, 1998).

Según Odum (1969) existen al menos cuatro atributos característicos del ecosistema que guardan relación con: i) la estructura del ecosistema, ii) el flujo de energía, iii) los ciclos biogeoquímicos y iv) la regulación u homeostasis. Los mismos cambian de una manera razonablemente predecible en el tiempo a medida que el ecosistema se desarrolla (teoría de sucesión). Un ecosistema “maduro” se encuentra estabilizado con una cantidad máxima de biomasa por unidad de energía disponible y con funciones de simbiosis entre los organismos. Sin embargo, perturbaciones externas, ya sea por acción humana u otro, pueden provocar un retroceso en el desarrollo hacia la estabilidad de un ecosistema.

Específicamente, en lo que respecta a los ecosistemas lóticos, éstos también muestran un carácter complejo donde componentes abióticos, como la columna del agua, los sedimentos y componentes bióticos como la fauna acuática y la vegetación ripariana mantienen relaciones de retroalimentación.

2.2.1. Complejidad

A manera de ejemplificar la complejidad de los sistemas lóticos se puede revisar la estructura de los mismos respecto al flujo de carbono (figura 3).

El carbono puede ser de origen alóctono o autóctono. El carbono alóctono es aquel aportado por la vegetación terrestre o ripariana en forma de materia orgánica particulada gruesa (**COPG**) como hojas y restos de madera. Otra forma de entrada de carbono alóctono proviene de la lluvia que gotea en las hojas (de la vegetación terrestre) y que disuelve exudados ricos en sustancias orgánicas solubles que ingresan al sistema. El tamaño de esta materia orgánica disuelta (**COD**) es menor a 0,5 micras. Por otra parte, también ingresa al sistema carbono inorgánico proveniente del CO₂ atmosférico. Mientras, el carbono autóctono proviene de la fotosíntesis realizada por autótrofos aportando al sistema materia orgánica disuelta (COD). Esta materia orgánica disuelta se encuentra entonces disponible para microorganismos descomponedores. En tanto, descomponedores y fragmentadores convierten el COPG en materia orgánica particulada fina (**COPF**). Este COPF también puede provenir de las heces o exudados de los componentes bióticos del sistema (Allan, 1995; Contreras 1998; Biggs, 2005).

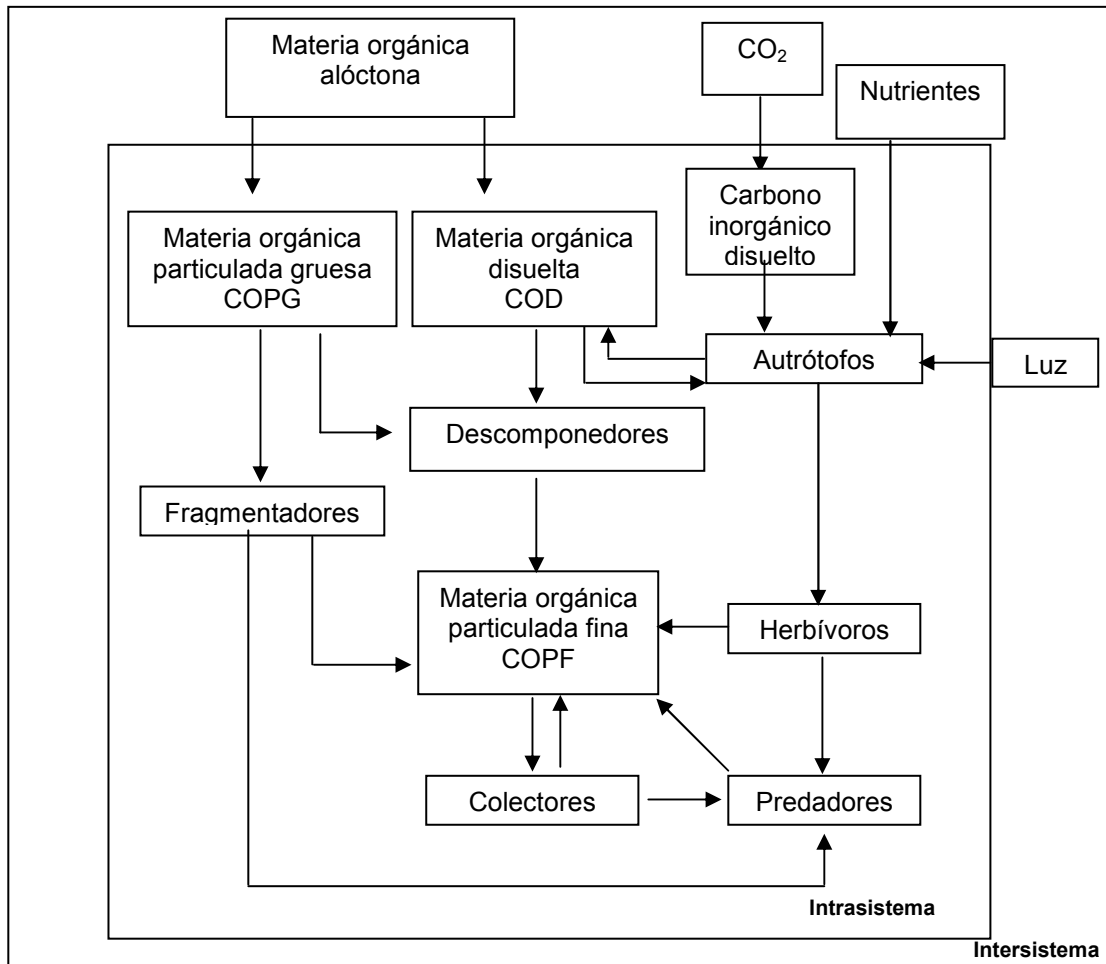


Figura 3. Modelo de la estructura de los ecosistemas lóticos de acuerdo el flujo de carbono.

Fuente: Contreras, 1998 (modificado de Cummins et al., 1973)

Tabla 1. Componentes de ecosistemas lóuticos en función del carbono

Componentes	Origen y función	Procesos, componentes o variables que lo afectan
<p>COPG Partículas mayores a 1 mm</p>	<p>En mayor proporción de origen alóctono transportado al cauce en formas de hojas y restos de madera. También proviene del arrastre de sedimentos desde áreas inundables</p> <p>Esta es una fuente importante de carbono para descomponedores y fragmentadores.</p>	<p>La entrada de esta fuente de carbono depende del clima, el caudal y el tamaño del cauce.</p> <p>Su transformación a otra forma depende de la acción de descomponedores y fragmentadores</p>
<p>COPF Partículas entre 1mm a 0,5 µm</p>	<p>Proviene de la fragmentación mecánica del COPG. También en menor magnitud de las fecas de componentes bióticos.</p> <p>También se reciben aportes de COPF desde aguas arribas</p> <p>Es la principal fuente de carbono para colectores.</p>	<p>La tasa de fragmentación del COPG por fragmentadores se encuentra relacionado con la tasa de descomposición, también de la temperatura y de los nutrientes (las tasas de fragmentación son mayores a elevadas temperaturas y concentración de nutrientes)</p> <p>Ya que depende en parte de la tasa de descomposición, los factores que estén involucrados en este proceso afectaran la cantidad o disponibilidad de esta forma de carbono</p>
<p>COD Partículas menores a 0,5 µm</p>	<p>Proviene en mayor proporción del agua subterránea, del lavado (“leaching”) del detritus de origen alóctono y del exudado de las hojas cuando el agua de lluvia tiene contacto con las mismas y cae al cauce.</p> <p>Es una importante fuente de carbono para descomponedores y autótrofos. Se estima que esta forma es la mayor reserva de carbono orgánico en las aguas.</p>	<p>EL COD es removido del agua del cauce por procesos bióticos y abióticos. El principal proceso biótico es su toma por microorganismos. Los procesos abióticos pueden ser la adsorción, precipitación y destrucción fotoquímica.</p> <p>Se ha estudiado que el lavado o leaching depende de la especie vegetal mientras que la composición iónica del agua, el pH y la turbulencia influyen la formación de partículas finas que estando invadidas por microorganismos son una fuente de energía para consumidores.</p>

<p>Carbono inorgánico</p>	<p>Proviene del CO₂ atmosférico</p> <p>Fuente de carbono para autótrofos.</p>	<p>La cantidad de carbono inorgánico en las aguas está influida por la naturaleza del terreno circulante y la descomposición que ocurre en las pozas de agua quieta.</p> <p>La mayor parte del carbono inorgánico se encuentra en formas de sales carbonatadas y bicarbonatos.</p> <p>La velocidad y la turbulencia producen un mayor intercambio de gases con al atmósfera.</p>
<p>Descomponedores Hongos y bacterias</p>	<p>Descomponen la materia orgánica alóctona y la hacen disponible para los demás componentes bióticos.</p> <p>Juegan un rol clave en el reciclaje de materiales y nutrientes en los sistemas lóticos</p>	<p>La descomposición está regulada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) disponibilidad de COD b) contenido de materia orgánica particulada c) tamaño de partículas del sedimento d) temperatura
<p>Autrótofos Perifiton (microalgas) y macrófitas (plantas mayores)</p>	<p>Fuente de carbono autóctono particulado y disuelto</p>	<p>Su crecimiento depende de :</p> <ul style="list-style-type: none"> a) la disponibilidad de luz para fotosíntesis, lo cual depende en parte de la vegetación ripariana b) nutrientes c) condiciones hidrodinámicas d) herbivoría
<p>Fragmentadores Tricópteros, plecópteros y otros invertebrados</p>	<p>Su fuente de carbono proviene básicamente de la materia orgánica alóctona.</p> <p>Realizan la fragmentación mecánica de COPG.</p> <p>Se ha estimado que aproximadamente 30% del COPF proviene de la actividad de los fragmentadores</p>	<p>Dependen de la materia orgánica alóctona, de la actividad de microorganismos (prefieren consumir hojas un poco descompuestas).</p> <p>También una variable importante para este componente es el tamaño del sustrato</p>

<p>Colectores Invertebrados como dípteros, efemerópteros y algunos tricópteros</p>	<p>Su fuente de carbono es la materia orgánica fina y la microbiota, especialmente bacterias y perifiton</p>	<p>Relaciones bióticas y variables externas forzantes como el caudal</p>
<p>Herbívoros Familias de efemerópteros, tricópteros, dípteros y coleópteros</p>	<p>Utilizan como fuente carbono la materia orgánica alóctona. Se piensa que una parte importante del carbono orgánico presente en los ecosistemas lóticos provenga de la herbívora</p>	<p>Relaciones bióticas (competencia-depredación), densidad de autótrofos y variables externas forzantes como el caudal</p>
<p>Depredadores Odonata, Megalóptera algunos plecópteros, dípteros y coleópteros</p>	<p>Consumen colectores, fragmentadores y herbívoros. Utilizan carbono orgánico alóctono y autóctono. Juegan un rol importante en la regulación de la estructura de los ecosistemas</p>	<p>Relaciones bióticas y variables externas forzantes como el caudal, calidad del agua, etc.</p>

Fuente: Allan, 1995; Contreras 1998; Biggs, 2005

Diferentes estudios en ríos templados estiman que la mayor parte de la energía en sistemas lóticos provenga de la materia orgánica producida fuera del cauce (alóctona) no solo de la vegetación ripariana sino también del arrastre de sedimentos desde las zonas inundables. Por esta razón se considera que los ecosistemas lóticos son sistemas exógenos, lo cual quiere decir, que su funcionamiento depende de la entrada de energía alóctona. Mientras, la degradación heterotrófica de esta materia alóctona sería la principal vía de incorporación del carbono orgánico para la cadena trófica (la producción primaria o autotrofia aportaría menor entrada de carbono disponible al sistema) (Allan, 1995). Sin embargo, en la zona central de Chile, debido a las fuertes pendientes topográficas y a las condiciones climáticas que impiden el desarrollo permanente de la vegetación ripariana terrestre, la producción de materia orgánica

autóctona podría cobrar una mayor importancia en el flujo de carbono orgánico (Contreras ,1998).

También se ha estudiado que la importancia relativa de diferentes fuentes de carbono y de la abundancia de ciertos tipos de organismos guarda relación con las características propias de la cuenca, el tipo de vegetación ripariana y el tamaño o ancho del cauce. A esto se encuentra relacionado un modelo denominado “río continuo” que describe como la función de un ecosistema lótico cambia a través de un gradiente altitudinal. En arroyos estrechos con abundante vegetación ripariana (que además le da sombra al cauce) se piensa que el COPG (materia autóctona) es la fuente crítica de carbono. Aguas abajo donde el río se ensancha y recibe aporte de otros arroyos, la luz puede penetrar hasta el fondo del cauce aumentando la producción de perifiton. Se espera también un transporte significativo de COPF aguas abajo (dado el proceso biológico del COPG aguas arriba). Entonces, macrófitas y colectores suelen ser más abundantes en las aguas calmas de la planicie (Allan, 1995; Contreras 1998; Biggs, 2005).

La descripción de la estructura de los ecosistemas lóticos en función del carbono permite evidenciar la complejidad de los mismos. En un ecosistema existen numerosos componentes, los cuales cumplen diversas funciones y son descritos en relación a una pregunta formulada previamente. Por otra parte, existen múltiples variables y procesos ecosistémicos que pueden cambiar el tamaño o los atributos de los componentes del ecosistema. En relación a esto último, se ha estudiado que la regulación del flujo hídrico provoca la modificación de la estructura anteriormente descrita (Contreras, 1998; Beattie, 2002) por lo cual, se piensa que para conservar los ecosistemas lóticos es necesario entender el rol del régimen hidrológico (Arthington et al., 1992; Richter et al., 1996; Poff et al., 1997).

2.2.2. Flujo hidrológico y funcionalidad

Un nuevo paradigma del “flujo natural” postula que las variaciones hidrológicas (con valores característicos de sus elementos críticos) son claves para mantener la

funcionalidad los ecosistemas lóaticos (Arthington et al., 1992; Richter et al., 1996; Poff et al., 1997).

Según Poff et al. (1997), existen al menos cinco elementos críticos del régimen hídrico que regulan los procesos ecológicos en ríos, los cuales son:

1) Magnitud de la descarga: es el volumen de agua pasando por una sección por unidad de tiempo.

2) Frecuencia: es cuán a menudo se encuentra un caudal por encima de una magnitud dada para un intervalo de tiempo específico.

3) Duración: es el periodo de tiempo asociado con una condición de flujo específica. La duración puede ser definida tomando en cuenta un evento particular del caudal, por ejemplo, una zona inundable puede ser inundada por un número de días específico en diez años, o la duración puede ser definida como el número de días al año en que el flujo excede algún valor predeterminado.

4) Predictibilidad: es definido como la regularidad con que ocurre una cierta magnitud de descarga. Esta regularidad puede ser definida formal o informalmente y con referencias a distintas escalas de tiempo, por ejemplo, los picos anuales de caudal pueden ocurrir con baja o alta predictibilidad.

5) Tasa de cambio: se refiere a cuan rápido cambian los caudales de una magnitud a otra.

El modelo desarrollado por este autor (Poff et al., 1997) señala que estos cinco elementos pueden modificar la condición física y química del agua, los recursos alimenticios, las interacciones bióticas y la heterogeneidad del hábitat, lo que finalmente produce cambios en los patrones y procesos ecológicos (figura 4).

En síntesis, las distintas magnitudes de los caudales naturales de agua, como se muestra en la Tabla 2, determinan cambios ecosistémicos, modificando las características químicas del agua y geomorfológicas del cauce, dinámicas poblacionales y comunitarias, la disponibilidad de alimentos y/o nutrientes y los flujos de energía.

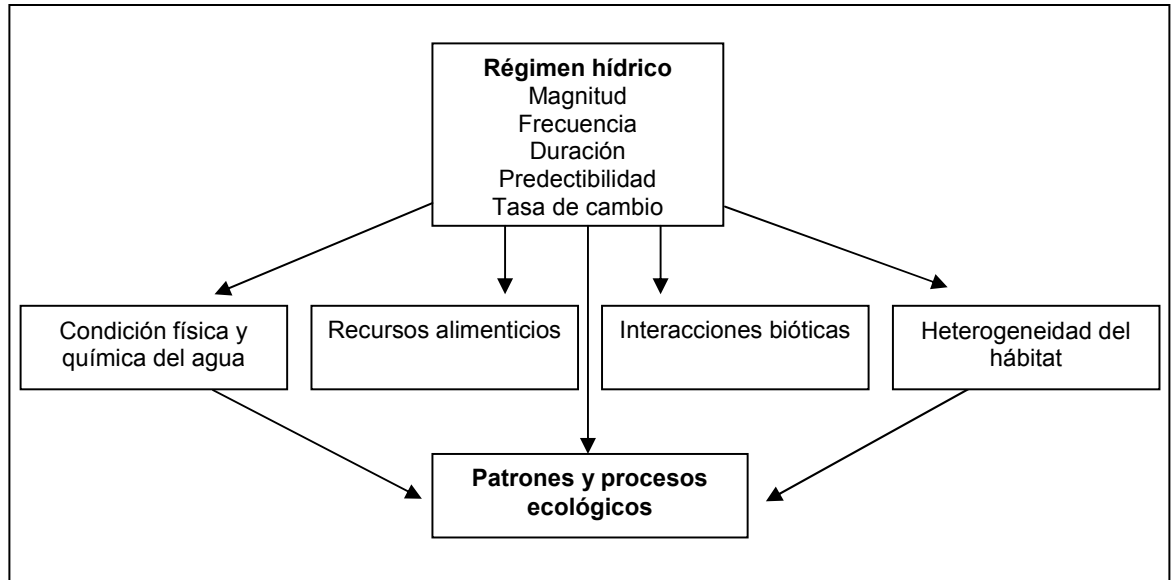


Figura 4. Modelo teórico de la influencia del régimen hídrico sobre los patrones y procesos ecológicos.

Fuente: Poff et al., 1997

Tabla 2. Funciones ecológicas de diferentes niveles de caudal

Niveles de caudales	Funciones ecológicas
Flujos bajos (de base)	<p>Niveles Normales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mantener la temperatura del agua y oxígeno disuelto • Capacitar a los peces de moverse hacia área favorables para su alimentación y de desove • Proveer el espacio de hábitat adecuado para organismos acuáticos • Mantener en suspensión los huevos de peces y anfibios • Mantener organismos de las zonas hiporreicas • Mantener el acuífero en zonas inundables <p>Niveles de sequía:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mantener especies vegetales en las áreas inundables • Evitar la invasión de especies introducidas en las comunidades riparianas y acuáticas • Limitar la presa en pequeñas áreas favoreciendo a predadores
Flujos altos	<ul style="list-style-type: none"> • Restituir la calidad de agua después de prolongados flujos bajos o de la emisión de contaminantes • Mantener las condiciones de salinidad en estuarios • Prevenir que la vegetación ripariana invada los cauces • Moldear las características físicas de los cauces • Determinar el tamaño de los sustratos
Flujos de inundación	<ul style="list-style-type: none"> • Depositar nutrientes en el área inundable • Depositar gravas y grandes sedimentos en áreas de desove • Acarrear materia orgánica dentro del cauce • Dispara una nueva fase en el ciclo de vida de algunos insectos • Mantener la biodiversidad vegetacional en la zona inundable • Controlar la distribución y la abundancia de las plantas en el área inundable • Puede dificultar la invasión de especies introducidas • Mantener el balance de especies en las comunidades acuática y ripariana • Capacita a los peces a desovar en área inundables • Moldea el hábitat físico de las áreas inundables • Dispersa semillas y frutas de las plantas riparianas • Maneja los movimientos laterales del cauce formando nuevos hábitat • Recarga el acuífero de la zona inundable

Fuente: Postel y Richter, 2003

2.2.3. Relaciones intersistémicas y funcionalidad

Como se observa, los distintos niveles de caudales con una cierta frecuencia o duración juegan un rol importante en la conservación de los ecosistemas lóticos. Pero esto también es debido a que los flujos de agua mantienen las relaciones intersistémicas, es decir, el intercambio de materia y energía entre el sistema acuático y el terrestre. Recientes conceptos en la ecología de arroyos afirman que la principal entrada de material orgánico e inorgánico a los ecosistemas acuáticos proviene de la interfase tierra-agua (Stanley et al., 1991; Bayley, 1995). Las interacciones entre sistemas acuáticos y terrestres incluyen la modificación del microclima (luz, temperatura, humedad), alteración de la entrada de nutrientes, aporte de materia orgánica a arroyos y áreas de inundación y retención de las entradas de nutrientes (Stanley et al., 1991).

La vegetación ripariana terrestre juega roles muy importantes en los sistemas acuáticos influyendo en 1) la cantidad y calidad de la luz disponible para los productores primarios (autótrofos), 2) **la entrada de materia orgánica al cauce (esta entrada, en general, es la mayor fuente de ingreso de carbono al sistema acuático)**, 3) procesamiento de la materia orgánica (se ha estudiado que la tasa de descomposición de hojas o restos de maderas provenientes de zonas riparianas depende de la especie vegetal que entra al cauce), 4) abundancia y composición de detritívoros, y 5) disponibilidad de alimentos para herbívoros, entre otros (Stanley, 1991; Allan, 1995).

De esta manera, cuando se propone conservar el ecosistema lótico muchos investigadores enfatizan la importancia que tienen las relaciones intersistémicas en la mantención de los flujos intrasistémicos.

2.3. Efectos causados por grandes embalses

El flujo “natural” de energía y materia de los ecosistemas lóticos, que los mantiene en un cierto estado de desarrollo, es impactado por la construcción de embalses

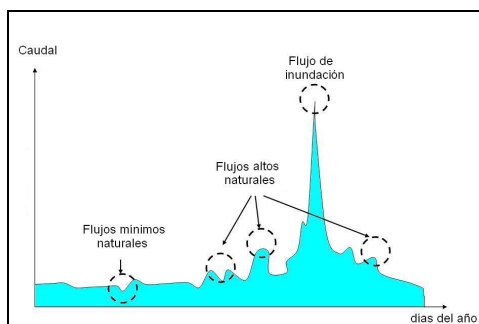
provocando tanto una alteración del régimen hidrológico, como una alteración en el flujo de nutrientes y en la entrada de energía al sistema.

En cuanto a la modificación en el régimen hidrológico, en general, los embalses causan la disminución de los caudales y de su predecibilidad; o en el caso de embalses para generar electricidad ocasionan un aumento de la variabilidad y esporádicamente de los caudales (Postel y Richter, 2003).

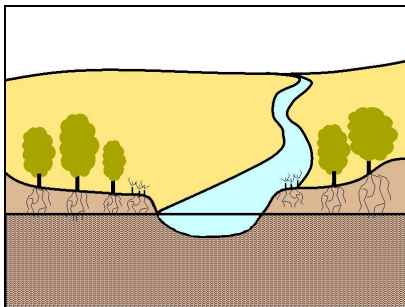
En la figura 5 se presenta un ejemplo de cómo un gran embalse puede alterar los patrones del flujo natural. En la parte (a) se distingue como flujos bajos naturales permiten un continuo de agua transportando materiales y energía aguas abajo, así como también permite el desplazamiento de la macro fauna acuática (en general depredadores). Se observa que el agua subterránea alcanza un nivel suficiente como para suplir a la vegetación adyacente al cauce. También caudales muy altos inundan zonas adyacentes permitiendo intercambios intersistémicos. Sin embargo, cuando se altera el régimen temporal disminuyendo los caudales y la variabilidad (parte b de la figura 5) el continuo de agua puede interrumpirse, modificando claramente el flujo de materiales y deteriorando la calidad del agua.

Se ha estudiado que estos cambios producidos por la disminución de los caudales favorece el desarrollo de la cobertura algal aumentando la biomasa de autótrofos. Por otra parte, el arrastre de la materia orgánica alóctona orgánica producida y transformada en los ecosistemas terrestres a los ecosistemas lóticos durante los periodos de mayores caudales, no ocurre, por lo tanto los flujos de materia orgánica alóctona disminuyen y con ello puede también disminuir la biomasa de fragmentadores y predadores (Allan 1995).

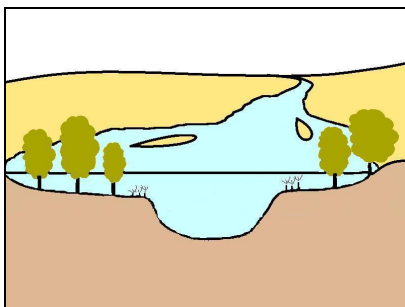
(a) Flujos naturales



Régimen "natural" de un río. Con flujos bajos, picos de flujos mas altos y flujos de inundación

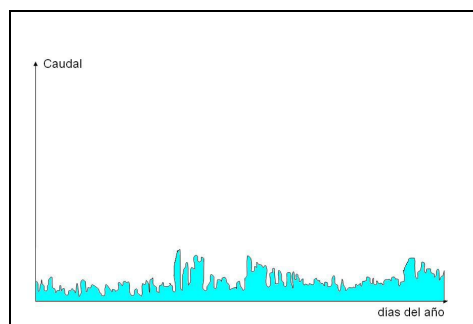


Flujos de baja magnitud son suficientes para mantener la calidad de las aguas, recargar el acuífero y transportar nutrientes, entre otros

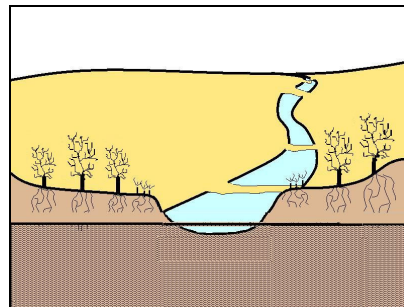


Los flujos de inundación crean espacios en las zonas inundada ricas en nutrientes, con mayores temperaturas donde peces y otros organismos móviles se desplazan para su alimentación y reproducción

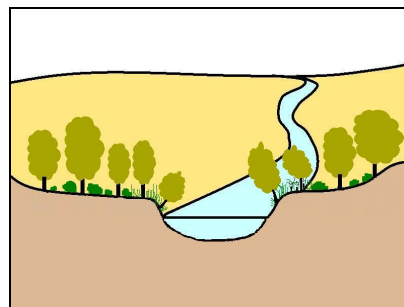
(b) Flujos modificados por un embalse



Régimen "alterado" por el funcionamiento de un embalse. Desaparecen las crecidas y se mantiene un flujo de bajas magnitudes



Flujos de muy baja magnitud no permiten la recarga del acuífero y causa la pérdida de biomasa de vegetación ripariana



La ausencia de altos flujos de inundación afecta los hábitats de reproducción y alimentación para distintas especies. Se pierde la conectividad entre la zona inundable y el cauce. Se producen cambios en relaciones intersistémicas

Figura 5. Modificación del régimen natural por los embalses.

Fuente: Postel y Richter, 2003.

A su vez, la disminución de la variabilidad y predecibilidad también contribuye al aumento de la biomasa de autótrofos y plantas mayores (Allan, 1995, Poff y Palmer, 1997, Valett et.al., 1997). Este crecimiento de plantas genera una mayor resistencia al flujo provocando una reducción en la habilidad del cauce para transportar el agua de las crecidas (Allan, 1995).

Por el contrario, cuando se liberan altos caudales de una forma esporádica o altamente variable se arrastra la vegetación algal (disminuye en forma inmediata la biomasa de autótrofos). También disminuye la biomasa de colectores y fragmentadotes y esto se explica en parte porque la heterogeneidad espacial disminuye, el sustrato se compacta y disminuye el hábitat para estos componentes bióticos (Allan 1995).

Por otra parte, se postula que la alta variabilidad y/o impredecibilidad en el régimen provee un modelo físico en el cual los procesos abióticos son importantes en controlar los procesos y contribuir a los patrones ecológicos observados. Los regímenes hídricos más predecibles conducen al desarrollo de interacciones bióticas más fuertes como competencia o depredación, las cuales pueden influir directamente sobre patrones ecológicos observados (Poff y Ward, 1989).

Algunos de los efectos indirectos y a nivel poblacional o comunitario por la regulación de la magnitud y temporalidad del flujo se resumen en la tabla 3.

En lo que se refiere a la alteración del flujo de nutrientes y entradas de energía al sistema, los embalses actúan como barreras para nutrientes y COPF. Los sedimentos en grandes reservorios de agua tienden a depositarse en el fondo de los mismos. Esto produce que aguas abajo disminuya la concentración de sedimentos, lo cual aunado a la disminución de la variabilidad del régimen hídrico contribuye al aumento de la abundancia del perifiton o macrófitas (Standford y Ward, 1979). Además, muchas veces cuando se construye un embalse una gran biomasa de vegetación ripariana es retirada para inundar el valle y los aportes de energía alóctono aguas abajo del muro del embalse se ven reducidos.

Tabla 3. Respuestas ecológicas a la alteración de los elementos del régimen hídrico

Elementos del Régimen	Alteración específica	Respuesta ecológica
Magnitud y Frecuencia	Incremento de la variación	<ul style="list-style-type: none"> • Arrastre y pérdida de especies sensibles • Aumento de la eliminación algal y arrastre de materia orgánica • Interrupción de los ciclos de vida • Alteración del flujo energético
	Estabilización del caudal	<ul style="list-style-type: none"> • Establecimiento o invasión de especies exóticas • Reducción de agua y nutrientes para las especies vegetales de la zona inundable, causando: <ul style="list-style-type: none"> - Dispersión ineficiente de semillas - Pérdida de hábitat y cauces secundarios necesarios para el establecimiento vegetal - Invasión de la vegetación ripariana dentro del cauce
Predictibilidad	Pérdida de los máximos estacionales del caudal	<ul style="list-style-type: none"> • Perturbación del ciclo íctico • Modificación de la estructura de la red alimenticia • Reducción de la vegetación ripariana • Invasión de vegetación ripariana exótica • Reducción de tasas de crecimiento vegetal
Duración	Caudales bajos prolongados	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la concentración de organismos acuáticos • Reducción y eliminación de cobertura algal • Disminución de la diversidad de especies vegetal • Desertificación de la composición de especies riparianas • Estrés fisiológico, produciendo reducción de la tasa de crecimiento, cambios morfológicos o mortalidad vegetal • Pérdida de huevos flotantes aguas abajo
	Caudales basales prolongados	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de huevos flotantes aguas abajo
	Duración de inundaciones alterada	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de cobertura vegetal alterado
	Inundaciones prolongadas	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio del tipo funcional de vegetación • Mortalidad arbórea • Pérdida de los hábitats de corrientes rápidas
Tasa de cambio	Cambios rápidos en el estado del río	<ul style="list-style-type: none"> • Arrastre de especies acuáticas, especialmente en estadios tempranos
	Inundaciones continuas	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de establecimiento de plantas nuevas

Fuente: Poff et al., 1997

Aunado a lo anterior los embalses también generan una variación de las temperaturas, cuando se libera el agua del fondo de los embalses se reduce la amplitud de los cambios diarios y estacionales de las temperaturas aguas abajo del embalse (sobre todo esto acontece con embalses muy profundos) (Pett y Amoros, 1996). Esto puede afectar el balance energético de los organismos y sus tasas vitales (Poff y Hart, 2002). Específicamente, se ha identificado un impacto significativo en la fauna bentónica (se reduce la riqueza de especies) (Allan, 1995).

Otro posible impacto de embalses profundos es la liberación de aguas anóxicas. Sin embargo, la turbulencia que se genera cuando se abren las compuertas de una represa podría re-oxigenar el agua en una corta distancia (Allan, 1995).

En términos generales se ha mostrado como los embalses alteran ciclos biogeoquímicos (Poff y Hart, 2002), las cadenas alimenticias y la productividad acuática (Wootton et al., 1969).

2.4. Origen del concepto caudal ecológico

Frente a la creciente demanda del agua, a finales de los años 20 en el Estado de Oregón se suscita el primer caso donde se limita la otorga de un derecho de agua para proteger la calidad escénica de las cascadas de agua en el río “Colombia River Gorge”. Sin embargo, es en el año 1971 cuando por primera vez en un estatuto gubernamental se define y se estipula la mantención de un “instream flow”. En este estatuto (Revised Code of Washington [RCW] 90/54.020) del Estado de Washington se estipulaba lo siguiente: “Los ríos permanentes deben ser mantenidos con flujos bases necesarios para la prevención de la vida silvestre, de los peces y de valores ambientales”.

Es en esa década de los setenta, cuando gestores y científicos comienzan a preocuparse específicamente por la reducción en la cantidad de agua corriente abajo de los embalses. A partir de la fecha surgió el término “minimum instream flow” incorporado en medidas o instrumentos que obligaban a mantener un flujo mínimo dentro del río para conservar poblaciones de peces que en general poseían un valor

comercial (Lamb, 1995). Por lo tanto, debía estimarse un flujo mínimo que permitiera sus desplazamientos y completar sus ciclos de vidas con el fin de sostener su producción y comercialización. Centrados en estos organismos se desarrollaron muchas de las técnicas hasta ahora utilizadas para calcular esa cantidad de agua requerida dentro del cauce.

Actualmente, el término instream flow (reconociendo la importancia de otras magnitudes de flujo, no solo la mínima) se puede entender como un caudal específico a mantener dentro de un cauce para cumplir con determinados objetivos de conservación propuestos para el manejo de una cuenca o un río en particular.

En países latinos la traducción o interpretación de este término ha generado expresiones como caudal mínimo, caudal ecológico y caudal ambiental dependiendo de los objetivos de cada institución de gestión.

El caudal mínimo, técnicamente según hidrólogos, es aquel caudal que ocurre en periodos de sequías proveniente del afloramiento de aguas subterráneas (Silveira y Silveira, 2003). Por otra parte, el **caudal ecológico** se ha entendido como aquel volumen de agua que se mantiene en el cauce de un río para alcanzar ciertos **objetivos de conservación ecológica**, mientras que un **caudal ambiental** aseguraría el cumplimiento de las **funciones ecológicas, sociales y económicas** de los cursos de agua (García de Jalón y Gonzáles del Tánago, 2002; Pelissari y Sarmento, 2003).

En general, como es el caso al menos en Chile, Brasil y España, se define un caudal ecológico con el objetivo final de conservar ecosistemas, sin embargo, lo conceptualizan como un caudal mínimo bajo las antiguas visiones de que un volumen mínimo, incluso constante, sería necesario para mantener poblaciones de peces específicos y suficiente para el desarrollo de los ecosistemas (DGA, 1999; García de Jalón y Gonzáles del Tánago, 2002; Pelissari y Sarmento, 2003).

2.5. Conservación a nivel ecosistémico

Debido a que el objetivo de conservación de países latinoamericanos ha sido la conservación de los ecosistemas acuáticos los esfuerzos deben estar destinados a generar un modelo simplificado del sistema para entender si se altera la estructura y funcionalidad del mismo. Bajo esta perspectiva ecosistémica no se estudian relaciones causa - efecto, como se realiza bajo una visión poblacional. En un estudio poblacional se intenta predecir cómo los factores físicos determinan ciertas condiciones químicas que afectan procesos biológicos y por último explican la existencia de una cierta población de organismos en un espacio dado. Mientras, bajo una visión ecosistémica, se estudian relaciones de retroalimentación entre componentes bióticos y abióticos para intentar entender finalmente la funcionalidad del ecosistema estudiado (figura 6).

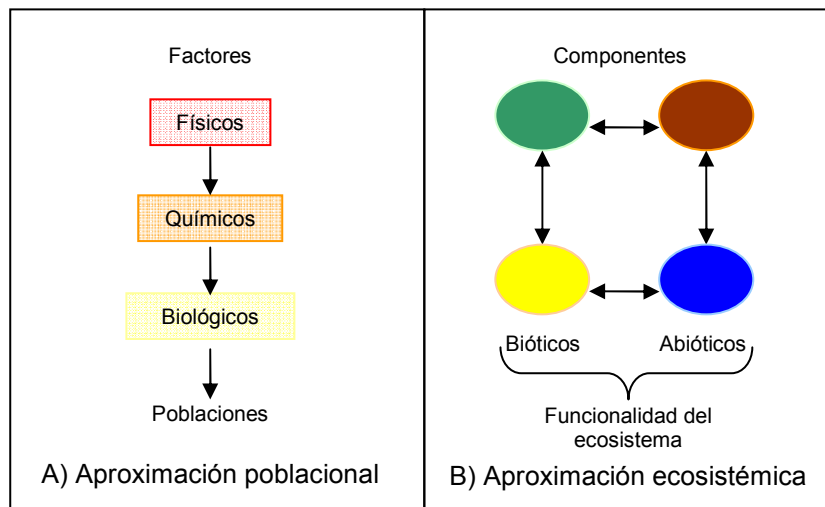


Figura 6. Aproximaciones de conservación

Fuente: Propia

Sin embargo, a pesar de expresarse la intención de conservar los ecosistemas lóticos, en general se ha estudiado ya sea los cambios en la biodiversidad, en la estructura de comunidades bentónicas o en la distribución o abundancia de grupos taxonómicos como peces, plantas y otros (Bunn et al., 1999). Si bien, el estudio de la distribución y abundancia de especies pueda ser importante en algunos casos, se piensa que no contribuye en gran medida a entender como el sistema en su totalidad funciona. La modificación de los patrones de distribución de especies pueden estar

relacionados con los procesos ecosistémicos, pero los patrones no son explicativos de los procesos (Bunn, 1999). Adicionalmente, diversos estudios muestran que la relación entre biodiversidad y las funciones ecosistémica no es lineal si no mas bien asintótica, lo cual sugiere que algunas especies influyen más en el funcionamiento del sistema que otras (hipótesis de la redundancia) (Joshi et al., 2001). Por otra parte, la biodiversidad (que muchas veces es el objetivo de conservación) es tan solo uno de los distintos atributos de los ecosistemas (Odum, 1969).

Según Townsed y Riley (1999), la capacidad para entender y predecir las consecuencias de los impactos antrópicos a los sistemas ribereños depende de la comprensión de los flujos de energía y materia a través de las cadenas tróficas. Mientras, Bunn (1999) afirma que los procesos a nivel ecosistémico son una medida “ideal” para determinar la “salud” de los sistemas, ya que proveen una respuesta integrada a las perturbaciones a nivel de cuenca.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Evaluar si el caudal ecológico tal como ha sido conceptualizado y aplicado contribuye en la conservación de los ecosistemas lóticos.

3.2. Objetivos específicos

- ✓ Evaluar teóricamente conceptos de caudal ecológico adoptados por organismos gubernamentales en Chile y otros países o Estados.
- ✓ Evaluar teóricamente metodologías utilizadas a nivel mundial para la determinación de un caudal ecológico.
- ✓ Evaluar teóricamente el proceso de determinación de un caudal ecológico en Chile.

4. HIPOTESIS

Los antecedentes muestran que la lógica inicial de aplicación del concepto caudal ecológico ha estado dirigida a determinar un caudal mínimo y en general constante durante todo el año, con el fin de conservar poblaciones de peces. Habitualmente no se consideran los flujos de materia y energía en el concepto de caudal ecológico como tampoco en otras medidas de mitigación o reparación de proyectos de infraestructura, como por ejemplo, embalses para generación eléctrica o de riego. Por otra parte, se considera al caudal como un factor clave que puede predecir la estructura de ecosistemas lóticos.

Sin embargo, desde un punto ecológico se sabe que i) la estructura y funcionamiento de los ecosistemas lóticos depende, en parte, de la periodicidad y cantidad del flujo hídrico descritos a través de los cinco elementos críticos definidos por Poff et al. (1997), por lo cual el caudal ecológico debería presentar un comportamiento similar al régimen hidrológico “natural”; y que ii) la estructura de ecosistemas lóticos se mantiene, en muchas situaciones, por aportes de energía de sistemas externos, por lo cual también se deberían mantener los flujos de materia y energía que alimentan al sistema (Poff et al., 1997, Stanley et al., 1991; Bayley, 1995). Así, para conservar ecosistemas lóticos se deben definir componentes bióticos y abióticos y entender que estos mantienen relaciones complejas y de retroalimentación. Lo que se busca mantener es: la estructura de los ecosistemas, el flujo de energía, los ciclos biogeoquímicos y la regulación u homeostasis, que caracteriza los ecosistemas y que se modifican en el tiempo por procesos naturales o debido a perturbaciones.

Por lo tanto, **si** el concepto de caudal ecológico originalmente ha sido ideado para mantener poblaciones de peces con un flujo de agua mínimo y constante dentro del cauce, **entonces** su uso con el objetivo de mantener la estructura y funcionamiento de ecosistemas lóticos debe presentar limitaciones. Al evaluar el éxito del concepto de caudal ecológico como medida de conservación de ecosistemas, éste debiera ser menor que cuando se trata de conservar poblaciones de peces.

5. MATERIALES y MÉTODOS

5.1. Evaluación de los conceptos de caudal ecológico

De acuerdo a la revisión bibliográfica, si se desea conservar un ecosistema lótico, es necesario que, la columna de agua sea pensada como un componente del sistema y al menos, sea mantenido un régimen hidrológico que emule los flujos naturales ocurridos antes de la modificación antrópica y a su vez este régimen sea pensado para mantener flujos intrasistémicos (no solo poblaciones específicas o relaciones bióticas) y flujos intersistémicos.

Por lo tanto, el caudal ecológico debe:

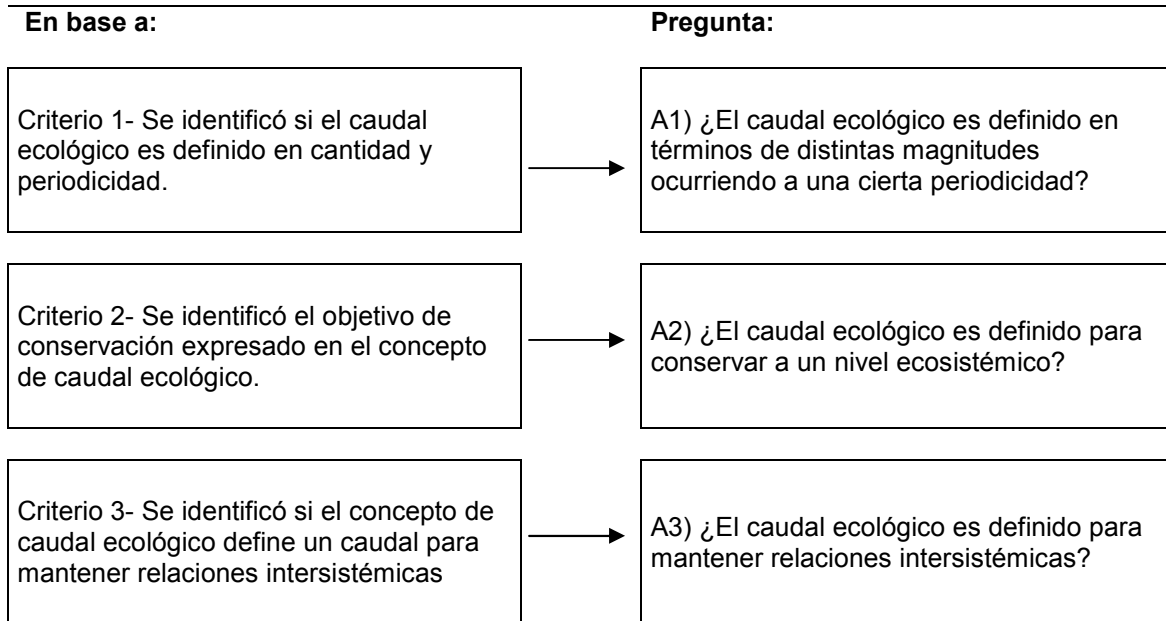
1. Estar conceptualizado como un caudal variable
2. Expresarse como un caudal para conservar un sistema ecológico
3. Expresarse como un caudal que permita flujos intersistémicos

A partir de estos criterios se realiza la evaluación de los conceptos de caudal ecológico adoptados por las instituciones del Estado de Washington (uno de los primeros Estados en adoptar esta medida), de la Provincia de Québec (donde funcionan numerosas hidroeléctricas de gran magnitud), de Brasil (por ser éste un país que ha incorporado recientemente el concepto de forma similar a Chile) y finalmente de nuestro país.

En una primera etapa se realizó la revisión de documentos (concernientes al estudio) de carácter gubernamental y legal publicados en los respectivos países antes mencionados. En los mismos se identificó: 1) la motivación o contexto que lleva a proponer un caudal ecológico, 2) el concepto explícito o implícito de caudal ecológico y 3) el objetivo de conservación que se pretende alcanzar con la mantención de un caudal ecológico.

En una segunda etapa, los conceptos de caudal ecológico se evaluaron bajo los criterios antes mencionados respondiendo las preguntas indicadas en el diagrama 1.

Diagrama 1. Preguntas para evaluar conceptos de caudal ecológico



Las respuestas negativas a estas preguntas entregaron un valor negativo a la evaluación igual a (-1) y las respuestas positivas aportaron un valor de +1 a la misma. En aquellos casos cuando se cumple parcialmente el criterio, se entregó un valor igual a +0.5 a la evaluación.

5.2. Evaluación de metodologías para la determinación del caudal ecológico

Como se ha establecido por Poff et al. (1997) el caudal ecológico a estimar debe estar expresado en función de los cinco elementos críticos del régimen hídrico que éstos definen. A su vez, deben estimarse flujos para mantener los diferentes atributos de un ecosistema y que permitan también conservar ciertas relaciones intersistémicas. Adicionalmente, estas relaciones intra e intersistémicas alteran o dependen de las condiciones físicas y químicas del agua, por lo tanto el flujo debe ser determinado para cumplir también con ciertos parámetros de calidad de las aguas (no solo en lo concerniente a contaminantes si no también a nutrientes).

Por lo tanto un método para determinar un caudal ecológico, debe:

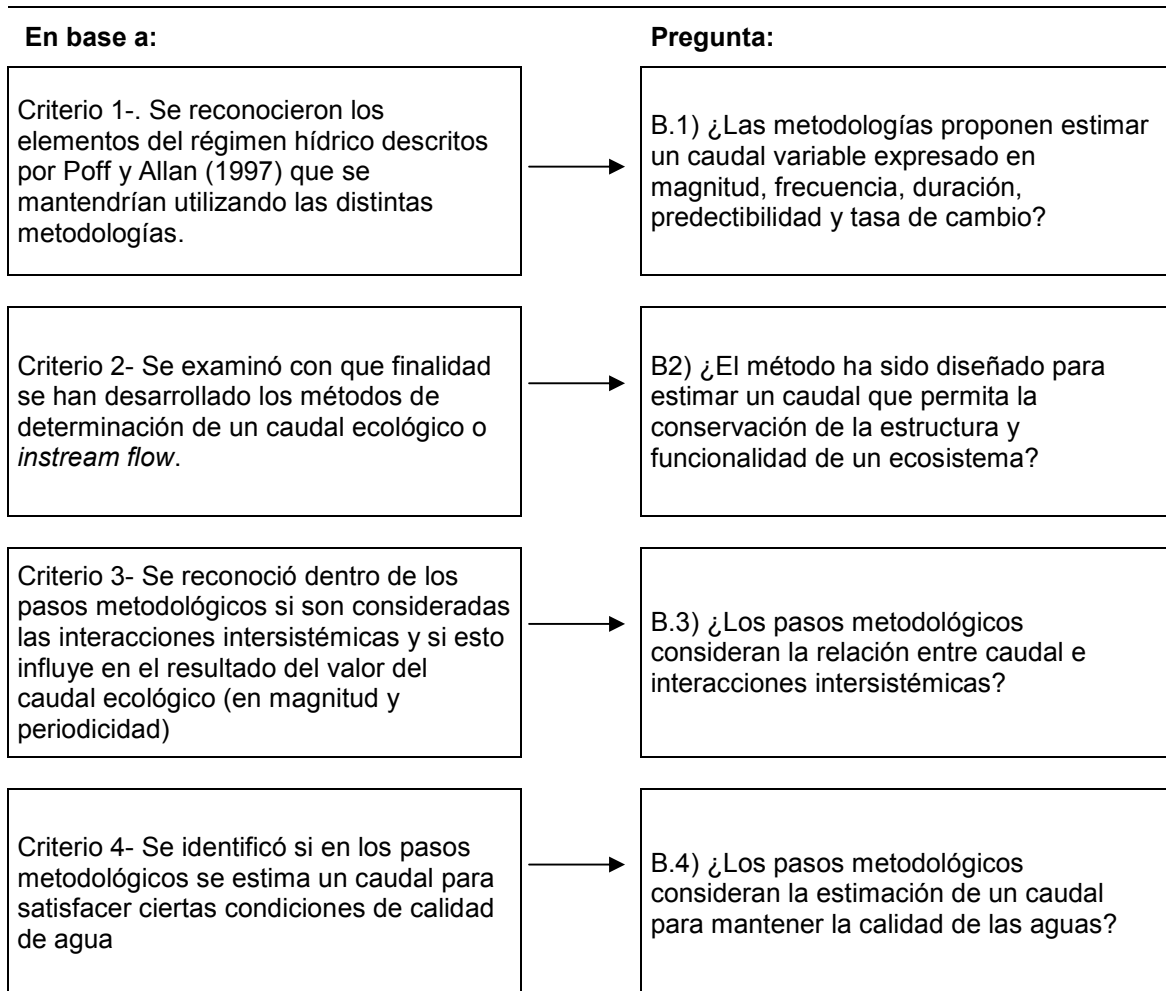
1. Estimar un régimen hidrológico expresado en magnitud, frecuencia, duración, predecibilidad y tasa de cambio
2. Estimar un régimen hidrológico en función de la estructura y funcionalidad de los ecosistemas
3. Determinar un flujo tal que se mantengan ciertas relaciones intersistémicas
4. Estimar un flujo que asegure una cierta calidad de las aguas.

Como primer paso se identificaron y describieron los distintos tipos de metodologías desarrolladas para la estimación de un caudal ecológico o *instream flow* (clasificadas según la Comisión Mundial de Embalses).

Posteriormente, estos métodos se evaluaron bajo los cuatro criterios descritos anteriormente como se muestra en el diagrama 2. De manera similar a la evaluación de los conceptos, una respuesta negativa a las preguntas señaladas en este diagrama, entrega un valor igual a (-1) y una respuesta positiva aporta un valor de +1 a la evaluación. Mientras la respuesta “parcialmente” entrega un valor igual de +0.5.

Adicionalmente, los métodos se compararon de acuerdo a aspectos de gestión definidos por King et al. (1999). Estos aspectos se refieren a la flexibilidad (lo cual da cuenta si los métodos pueden ser aplicados en distintos tipos de ecosistemas), complejidad (con lo que se mide la necesidad de conocimientos específicos, la calificación y cantidad de profesionales requeridos, etc) y costos (relativos entre los distintos tipos de métodos).

Diagrama 2. Preguntas para evaluar las metodologías de determinación de un caudal ecológico o *instream flow*



5.3. Evaluación de la aplicación de un caudal ecológico en Chile

En primera instancia, se buscó en la biblioteca central de la Dirección General de Aguas trabajos hasta entonces encargados por esta institución que guardaran relación con el caudal ecológico.

La información de dichos estudios se recopiló como se muestra en la ficha tipo1 remarcando el objetivo del trabajo, el concepto de caudal ecológico adoptado y la proposición metodológica que se entrega para cuantificar ese caudal.

Ficha tipo 1

Nombre del Estudio:	Fecha de presentación:
Mandante:	
Objetivo del estudio:	
Concepto de caudal ecológico:	
Método de cálculo de caudal ecológico: (a) Hidrológico simple, RVA (b) Hidráulico (c) Simulación de hábitat (d) Holístico	
Fuente:	

Posteriormente, se determinaron los criterios que maneja la DGA para otorgar nuevos derechos de agua y los métodos que proponen para que sus gestores regionales determinen un cierto caudal remanente en el cauce (sin otorgarlo).

Finalmente, se evaluaron los conceptos de caudal ecológicos adoptados por los estudios analizados de acuerdo a las preguntas señaladas en diagrama 1 y se evaluaron las metodologías propuestas en éstos según lo indica el diagrama 2.

En tanto, en la instancia de gestión del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, como primera etapa se consultó la base de datos en línea de CONAMA (www.e-seia.cl) donde se buscó cada proyecto de tipo “Presas y embalses” (tipo a.1) y “Centrales generadoras de energía mayores a 3 MW” (tipo c), los cuales tenían aprobado su Estudio de Impacto Ambiental (EIA) e ingresaron al sistema después de 1997 (cuando se pone en marcha el reglamento de la Ley 19.300).

Una vez obtenido los datos se procedió a buscar los informes, estudios y resoluciones que permitieron completar la ficha tipo 2, identificando los siguientes aspectos:

- ✓ Tipo de impacto declarado debido la modificación del flujo hídrico.
- ✓ Medida propuesta para mitigar o compensar el impacto declarado. En este punto se identifica el concepto implícito (o algunas veces explícito) de caudal ecológico
- ✓ Objetivo de conservación que se pretende alcanzar con la medida propuesta. Al identificar este aspecto se infiere a que nivel jerárquico ecológico se pretende conservar (¿se pretende conservar a un nivel poblacional, comunitario o ecosistémico al mantener un caudal ecológico?)
- ✓ Tipo y características de los métodos empleados para determinar un caudal ecológico.

Posteriormente, se evaluó tanto el concepto implícito de caudal ecológico manejado por cada titular de proyecto como los métodos que han sido empleados para determinar ese caudal dando respuestas a las preguntas del diagrama 1 y 2 respectivamente.

Ficha tipo 2

Nombre del Proyecto:		Región:	Nº Ficha:
Titular:			
Fecha de presentación:	Fechas de c/Addendum:		Fecha RCA:
Fecha de puesta en marcha:		Información disponible en:	
Impacto:	Medida:	Objetivo de conservación:	
Método de cálculo de caudal ecológico: (a) Hidrológico simple, RVA (b) Hidráulico (c) Simulación de hábitat (d) Holístico			
Seguimiento: Si No		Fuente:	

6. RESULTADOS

6.1. Conceptos de caudal ecológico

Como se muestra en la revisión bibliográfica, un caudal ecológico debe ser definido como un caudal variable que contribuya al desarrollo de los ecosistemas lóticos (delimitados de acuerdo a criterios explícitos). Sin embargo, como se presentan a continuación, muchos de los conceptos de caudal ecológico o conceptos derivados del término *instream flow* fueron ideados para mantener poblaciones de peces y bajo antiguas visiones de que una magnitud mínima es suficiente para conservarlos.

6.1.1. Caudal ecológico (*instream flow*) en Washington

Actualmente en Estados Unidos cada estado le confiere distintas finalidades a mantener un cierto caudal dentro del cauce, dependiendo de sus intereses y las actividades económicas que realizan. Por ejemplo, en el Estado de Washington, les preocupa primordialmente contar con suficiente agua para la pesca, mientras que en otros estados se fija un caudal para que los ríos sean navegables (Washington State Department of Ecology, 2001). Entonces, cada agencia autónoma identifica y prioriza para qué y con qué objetivos se mantiene un "instream flow".

En la instancia de otorga de derechos de agua, legalmente se reserva un caudal mínimo (establecido como norma) que pasa a ser otro tipo de derecho de agua limitando la utilización de ese volumen para otros fines.

Específicamente, en el Estado de Washington, el término "*instream flow*" es usado para identificar un flujo específico en un lugar dado por un tiempo definido y de acuerdo a las variaciones estacionales (pero siempre pensado como un flujo mínimo) (Estados Unidos, Revised Code of Washington [RCW] en Watershed Planning Act, 1998).

Instream flow: es el flujo o nivel mínimo de agua en arroyos, lagos u otro cuerpo de agua público para proteger los peces, aves u otros recursos de la vida silvestre, valores recreativos o estéticos

Extraído de Capítulo 90.22³ de Revised Code of Washington [RCW] en Watershed Planning Act, 1998.

En la legislación de este Estado (Watershed Planning Act, 1998) se explicita que uno de los objetivos del manejo del recurso hídrico además de proveer suficiente agua para las actividades humanas es de mantener la productividad de las poblaciones de peces para lo cual concentran mucho de sus esfuerzos (Washington State Department of Ecology, 2001).

Es así como en reiteradas ocasiones los flujos objetivos están de acuerdo a las necesidades de las poblaciones de peces en peligro de extinción registrados en la lista denominada *Endangered Species Act* (Washington State Department of Ecology, 2001).

6.1.2. Caudal ecológico (*débîts réservés écologiques*) en Québec

De manera similar en la Provincia de Québec se mantiene un caudal ecológico para conservar las especies de peces existentes en los ríos. Específicamente, el Ministerio de Fauna y Parques propone una política de caudales ecológicos denominada "*Politique de débîts réservés écologiques pour la protection du poisson et de ses habitats*" cuyo objetivo principal es minimizar los impactos negativos asociados a proyectos hidroeléctricos para así asegurar la conservación de hábitat de peces y su libre circulación en los cursos de agua (Faune et Parcs Québec, 1999).

³ En RCW artículo 90.22.010 se expresa textualmente lo siguiente: "The department of ecology may establish minimum water flows or levels for streams, lakes or other public waters for the purposes of protecting fish, game, birds or other wildlife resources, or recreational or aesthetic values of said public waters whenever it appears to be in the public interest to establish the same"

Según esta política el caudal ecológico debe variar de acuerdo a los períodos biológicos de las especies de peces para que así sean mantenidas las poblaciones objetivo. Sin embargo, pueden aceptar justificadamente que se estime un caudal constante para todo el año.

De esta manera el caudal ecológico es definido como:

Caudal ecológico o débit réservé écologique: caudal mínimo requerido para mantener el hábitat de los peces en un nivel que ha sido juzgado como aceptable. Este grado de aceptabilidad corresponde a una cantidad y a una calidad suficiente de hábitat que pueda asegurar el desarrollo normal de las actividades biológicas de las especies de peces para que así completen, en todo o en parte sus ciclos de vida en el cauce o los cauces perturbados. Estas actividades pueden estar relacionadas a la reproducción, a la alimentación y a la cría. En cuanto a la libre circulación de los peces (desplazamientos y migraciones) esta debe ser asegurada por cambios apropiados en el caudal ecológico o por construcciones particulares en embalses que permitan el paso de agua

Extraído de Politique de Débits Réservés Écologiques pour la Protection du Poisson et de ses Habitats⁴. Faune et Parcs Québec, 1999

De manera contraria, en países en desarrollo el concepto de caudal ecológico se ha propuesto con el objetivo de conservar los ecosistemas acuáticos, no especies de peces objetivos, como es el caso para Chile y Brasil.

6.1.3. Caudal ecológico (*vazão ecológica*) en Brasil

En el caso de Brasil aun no ha sido definido explícitamente en documentos gubernamentales lo que se debe entender como un caudal ecológico, sin embargo, en muchos estados de este país se establece por tramos de ríos ciertos caudales que deben permanecer en el cauce con una magnitud mayor a los caudales mínimos observados (Benetti et al., 2003). En tanto, a la hora de otorgar nuevos derechos de agua, el Consejo Nacional de los Recursos Hídricos (*Conselho Nacional dos Recursos Hídricos*) (CNRH) de Brasil estipula que al menos debe mantenerse un caudal mínimo

⁴ En la Política se expresa textualmente lo siguiente: “**Débit réservé écologique** est défini comme étant le débit minimum requis pour maintenir, à un niveau jugé acceptable, les habitats du poisson. Ce degré d’acceptabilité correspond à une quantité et à une qualité suffisantes d’habitats pouvant assurer le déroulement normal des activités biologiques des espèces de poisson qui accomplissent, en tout ou en partie, leur cycle vital dans le ou les tronçons perturbés. Ces activités peuvent être liées à la reproduction, à l’alimentation et à l’élevage. Quant à la libre circulation du poisson (déplacements et migrations), celle-ci doit être assurée par des modulations appropriées du débit réservé écologique ou par des aménagements particuliers aux sites infranchissables”.

en el cuerpo de agua que impida la degradación ambiental. Por lo tanto, el concepto implícito de caudal ecológico que se maneja en este organismo sería el siguiente:

Caudal ecológico o vazão ecológica: caudal mínimo en el cuerpo de agua necesaria para la prevención de la degradación ambiental, para la mantención de los ecosistemas acuáticos y de las condiciones necesarias para el transporte acuático, cuando sea pertinente, entre otros usos.

Extraído de artículo 21 de la Resolución número 16 del CNRH⁵, 2001

Según algunos investigadores sobre el tema en Brasil, el caudal ecológico es también una demanda de agua para conservar los ecosistemas, el paisaje y otros intereses (Pelissari y Sarmento, 2003).

6.1.4. Caudal ecológico en Chile

En tanto en Chile, según los lineamientos de la Política Nacional de los Recursos Hídricos el objetivo ecológico final del manejo de las aguas es la protección de los cursos de agua a un nivel ecosistémico.

Dentro de este contexto, DGA, al momento de otorgar nuevos derechos de agua comienza a considerar un **caudal mínimo** con el propósito de “**preservar los ecosistemas y los valores paisajísticos**” (DGA, 1999). Mientras, en las modificaciones recientemente aprobadas del Código de Agua de 1981 se estipula la mantención de un caudal ecológico mínimo para “velar por la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente” (Oficio n^o 5524, 2005). Concretamente al establecer los procedimientos para administrar las aguas, DGA adopta un concepto de caudal ecológico como se muestra a continuación :

Caudal ecológico: caudal mínimo que debieran tener los ríos para mantener los ecosistemas presentes, preservando la calidad ecológica

Extraído de Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos. DGA, 2002

⁵ En el artículo 21 de la Resolución número 16 del CNRH se expresa textualmente lo siguiente: “A autoridade outorgante manterá cadastro dos usuários de recursos hídricos contendo, para cada corpo de água, no mínimo:...a vazão mínima do corpo de água necessária à prevenção da degradação ambiental, à manutenção dos ecossistemas aquáticos e à manutenção de condições adequadas ao transporte aquaviário, quando couber, dentre outros usos”.

Por otra parte, CONAMA (1998), encargada del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, en 1998 define al caudal ecológico como:

Caudal ecológico: caudal mínimo que da cuenta de la conservación de la biodiversidad propia del curso en cuestión, adecuado para asegurar el cumplimiento de las funciones y servicios ecológicos del medio acuático, como lo son la mineralización, asimilación, entre otros.

Extraído de Documento de Discusión: Gestión Integrada del Recurso Agua CONAMA, 1998.

6.2. Evaluación de los conceptos de caudal ecológico

En la tabla 4 se pueden observar las diferencias entre los distintos países en relación a los objetivos perseguidos en las políticas de gestión del agua que introducen el concepto de caudal ecológico, su coincidencia con el objetivo expresado en el concepto mismo y los elementos del flujo hídrico que toma en cuenta el concepto de caudal ecológico.

Tabla 4. Comparación de conceptos de caudal ecológico en distintos estados o países

País o Estado	Elementos del flujo hídrico tomados en cuenta en concepto de caudal ecológico	Objetivo de conservación según políticas donde se introduce caudal ecológico	Objetivo de conservación expresado en concepto de caudal ecológico
Washington	Magnitud mínima	Mantener poblaciones de peces, pesca, usos recreativos, navegación, etc.	Mantener poblaciones de peces, aves u otros recursos de la vida silvestre, valores recreativos o estéticos
Québec	Magnitud mínima	Mantener el hábitat y desplazamiento de peces	Mantener el hábitat y desplazamiento de peces
Brasil	Magnitud mínima	Mantener los ecosistemas, paisajes y otros usos	Evitar la degradación ambiental. Mantener ecosistemas, paisajes y otros usos
Chile	Magnitud mínima	Conservar los ecosistema acuáticos	Asegurar biodiversidad y servicio ecológicos (CONAMA) vs. mantener ecosistemas (DGA)

Fuente: Propia.

Es importante en este punto denotar que en Norte América, en general, los objetivos perseguidos con la mantención de un “instream flow” o caudal ecológico son

diferentes a los existentes en Latino América. En Estados Unidos y Canadá el concepto de caudal ecológico fue concebido originalmente como una medida para mantener las poblaciones de peces, mientras que en Brasil y Chile se propone un caudal ecológico para conservar a un nivel de ecosistema.

Es bajo el objetivo de mantener algunas especies en peligro o de valor para la pesca que el Estado de Washington en la instancia de otorga de derechos de agua define un *instream flow* considerando tan solo el componente magnitud y su valor mínimo para preservar las comunidades de peces. Bajo los criterios ecológicos de esta investigación el concepto de *instream flow* en el Estado de Washington teóricamente no permitiría la conservación de los ecosistemas lóticos ya que se intenta mantener tan solo poblaciones específicas (siendo la biodiversidad tan solo un atributo del ecosistema) manteniendo niveles mínimos de agua. Sin embargo, se destaca que la conservación del ecosistema no es el propósito por el cual fue propuesto el concepto de *instream flow* en Washington.

De la misma manera en Québec se pretende resguardar poblaciones de peces al reservar un caudal ecológico. Si bien se espera que se mantengan caudales variables por estación (según lo recomendado en su política), el caudal ecológico sigue siendo definido como un caudal mínimo y ese caudal se estimaría de acuerdo a los requerimientos de hábitat y desplazamientos de los peces diferenciándolo por estación. Si bien la variación de un caudal cada tres o cuatro meses puede ser favorable para algunos peces esto no implica que favorecerá el desarrollo del ecosistema. Por ejemplo, si bien los peces necesitan de las zonas inundables para el desove, el volumen mínimo para ello puede ser insuficiente para recargar el acuífero de estas zonas, lo cual perturba a la vegetación ripariana. También flujos de inundación favorables para la reproducción de los peces pueden reducir otras poblaciones como las de insectos acuáticos o de crustáceos dado a que estos serían arrastrados aguas abajo, o la tasa de cambio de una magnitud baja a otra de inundación puede ser muy rápida arrastrando otras especies acuáticas en estadios tempranos.

Resaltando este aspecto, tanto la tasa de cambio, como la frecuencia y duración claramente no son considerados dentro del concepto de caudal ecológico ni en la política de los *débites réserves* de Québec.

De esta manera, se reitera que un concepto de caudal ecológico definido como un caudal mínimo y para conservar poblaciones de peces no implicaría la conservación de los atributos ecosistémicos. Por otra parte, a diferencia de otros conceptos, positivamente el caudal ecológico en Québec se define no solo en términos de cantidad si no también de calidad.

A pesar de ser un poco más ambiciosos en Chile y en Brasil, definiendo un caudal ecológico en el contexto de que esto contribuye en la conservación de los ecosistemas acuáticos, las instituciones gubernamentales de estos países continúan considerándolo como un caudal mínimo y factor que influye sobre las poblaciones.

En el caso particular de Brasil, el concepto de caudal ecológico es un poco ambiguo en cuanto al objetivo final que se pretende con el mismo, queda abierto a las interpretaciones de los gestores e incluso se estima que un cierto caudal mínimo podría conservar los paisajes y otros usos humanos, asemejándose a un concepto de caudal ambiental y al concepto de intream flow del Estado de Washington. Si bien se evalúa positivamente que en el concepto se exprese explícitamente la conservación del ecosistema, a juicio del autor, no se encuentra interiorizada la visión ecosistémica.

En el caso específico de Chile, además de ser definido el caudal ecológico como un caudal mínimo, los dos organismos encargados de la gestión de las aguas parecieran perseguir niveles de conservación distintos (biodiversidad y servicios ecológicos versus ecosistemas y paisajes).

El concepto de caudal ecológico dado por CONAMA que estipula la mantención de la biodiversidad merece un análisis más profundo. La biodiversidad es definida como el número de especies observadas en un territorio delimitado. En general, se tiende a pensar que cuando la biodiversidad aumenta, el ecosistema que la sustenta se

desarrolla y aumenta su resiliencia (aunque esto es aún muy discutido) (Odum y Samiento, 1998), por esto muchas veces el objetivo de diversas medidas de gestión es mantener la diversidad biológica. Además la biodiversidad es un concepto simple que la sociedad en general entiende y valora. Sin embargo, puede aumentar la biodiversidad pero la composición de especies cambiar significativamente, así como las relaciones y muchos de los flujos energéticos. También como se expresa en revisión bibliográfica (punto 2.5), la relación entre biodiversidad y funcionalidad del ecosistema puede no ser lineal. Otro problema es que el concepto de biodiversidad “esconde” el número de organismos presentes de una misma especie y el nombre y función de la especie. Por ejemplo, en un río podría aumentar el número de especies de vegetación acuática y disminuir la densidad de la fauna acuática manteniéndose una alta la biodiversidad. Sin embargo, el ecosistema podría cambiar a un estado menos desarrollado.

Por otra parte en el concepto se distingue que el caudal ecológico definido como mínimo no está pensado para mantener la vegetación terrestre adyacente. La importancia del caudal está enfocada específicamente a la mantención de especies acuáticas dentro del cauce. Pero como se sabe estas especies pueden depender en alto o mediano grado de la materia orgánica alóctona (aportada por la vegetación ripariana).

Finalmente en la tabla 5 se presenta la evaluación de los conceptos por estado o país a través de las preguntas propuestas (como se explicita en pasos metodológicos).

Tabla 5. Evaluación de los conceptos de caudal ecológico

País o Estado	¿El caudal ecológico es definido en términos de distintas magnitudes de flujo?	E	¿El caudal ecológico es definido para conservar a un nivel ecosistémico?	E	¿El caudal ecológico es definido para mantener relaciones intersistémicas?	E	Evaluación (E) final
Washington	No, solo se define como un flujo mínimo	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-3) El caudal ecológico definido como un caudal mínimo para mantener poblaciones de peces no asegura la conservación de los ecosistemas lóticos
Québec	No, solo se define como un flujo mínimo	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-3) El caudal ecológico definido como un caudal mínimo para mantener poblaciones de peces no asegura la conservación de los ecosistemas lóticos
Brasil	No, solo se define como un flujo mínimo	(-1)	Si	(+1)	No	(-1)	(-1) A pesar de que el caudal ecológico implícitamente ha sido definido para conservar los ecosistemas, al conceptualizarlo como un caudal mínimo no se mantendría el desarrollo "normal" de los ecosistemas
Chile	No, solo se define como un flujo mínimo	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-3) Al definir un caudal ecológico como un volumen mínimo de agua para mantener la biodiversidad dentro del cauce no se estaría intentando conservar a un nivel ecosistémico

Fuente: Propia

6.3. Descripción de métodos para la determinación de un caudal ecológico

En este estudio los métodos se agrupan de acuerdo a bases teóricas similares y acorde con lo descrito por la Comisión Mundial de Embalses (King et al., 1999). Una breve descripción de cada uno de ellos es mostrada a continuación, sin embargo, para una mejor comprensión de la evaluación de los mismos en el anexo 1 son entregados mayores detalles.

- ✓ Métodos hidrológicos: en éstos se considera que las comunidades han evolucionado en respuesta a un cierto tipo de régimen hidrológico, por lo tanto, los organismos de estas comunidades están adaptados a las variaciones estacionales propias de dicho régimen. Estas variaciones “naturales” afectan el comportamiento, ciclo biológico y producción de las poblaciones. Dentro de estos métodos se identificaron aquellos clasificados como hidrológicos simples, entre los que se encuentran el método de Curva de Permanencia, método de Tennat, método del caudal mínimo de siete días con periodo de ocurrencia de diez años (${}_7Q_{10}$) y métodos europeos. Mientras que el Método de Aproximación por Rangos de Variabilidad (RVA) fue clasificado como otro tipo de método hidrológico por su complejidad y por estimarse con el uso del mismo caudales variables (a diferencia de los anteriores).
- ✓ Métodos hidráulicos: Al idear estos métodos se considera que variables hidráulicas simples como el perímetro mojado o la profundidad máxima son factores limitantes en la sobrevivencia de la biota dentro del cauce. Uno de los métodos más usados ha sido el método de Perímetro Mojado que relaciona el caudal con el perímetro mojado del cauce.
- ✓ Métodos de simulación de hábitat: Según este tipo de método se piensa que los peces están mejor adaptados a ciertas características hidráulicas y geomorfológicas de los cursos de agua, al conocer cómo afecta el caudal a estas características se puede predecir el caudal óptimo para mantener sus poblaciones. Dentro de este tipo el método IFIM ha sido el más comúnmente utilizado.
- ✓ Métodos holísticos: En estos métodos se asume que: 1) algunas características del flujo natural son más importantes ecológicamente que otras (por ejemplo algunos

flujos de base y de inundaciones); y 2) si son identificadas las características esenciales del flujo hídrico que pueden generar un impacto ecológico y estas son incorporadas dentro de un régimen de flujo modificado, entonces la biota y la integridad funcional del ecosistema será mantenida (Bragg et al., 1999 y King y Louw, 1998). Estos tipos de métodos han sido elaborados en Sur África (ideando el método de “Building Block”) y en países como Australia y Nueva Zelanda (los cuales diseñan, por ejemplo, el método de “Benchmarking”).

La tabla 6 muestra la comparación entre los distintos tipos de métodos existentes en relación a aspectos ecológicos (derivados de criterios ecológicos mencionados en Materiales y Métodos) y a aspectos de gestión según lo investigado por King y colaboradores (1999). Como se observa mas claramente en la tabla, muchos de los métodos determinan un caudal mínimo siendo este mismo pensado para conservar poblaciones de peces. Tan solo el método RVA y los de tipo holístico toman en cuenta directa o indirectamente la importancia del caudal en mantener interacciones intersistémicas, esto con el propósito final de conservar los ecosistemas acuáticos. También los métodos holísticos son los únicos que explícitamente consideran la importancia de mantener la calidad de las aguas.

Por otra parte, en términos de gestión (tabla 7), se considera de baja flexibilidad a métodos que no pueden ser aplicados en la mayoría de los ecosistemas acuáticos, como por ejemplo, los métodos hidráulicos que consideran ríos con cauces estables y secciones rectangulares, siendo que poco ríos presentan estas características. En tanto, los métodos denominados como de flexibilidad “alta con precaución” son aquellos que pueden ser aplicados en una vasta variedad de ecosistemas lóticos pero con el cuidado de no adoptar los valores que se determinan en ríos diferentes; solo serían generalizables sus procedimientos. Los costos que se presentan en la tabla son relativos a los costos de los métodos con que se comparan y el grado de complejidad de los mismos se determinó de acuerdo al tiempo requerido, el grado de conocimientos y la necesidad de personal calificado o número de especialistas para llevar a cabo la determinación del caudal ecológico.

Tabla 6. Comparación de métodos para determinar un caudal ecológico en relación a aspectos ecológicos

Tipo	Aspectos ecológicos		
	Elementos del flujo hídrico	Objetivo de conservación	Relaciones estudiadas
Hidrológicos			
a) simples	Magnitud	En general, mantener poblaciones de peces (depredadores tope)	Caudal-biota acuática
b) RVA	Magnitud, predecibilidad, duración, frecuencia y tasa de cambio	Ecosistemas	i) Caudal- interacciones intra e intersistémicas
Hidráulicos	Magnitud	En general, mantener poblaciones de peces	Caudal-características hidráulicas
De simulación de hábitat	Magnitud	En general, mantener poblaciones de peces	i) Caudal-características hidráulicas y geomorfológicas- ii) Caudal- poblaciones de peces
Holísticos	Magnitud, duración y predictibilidad	Ecosistemas, valores económicos y culturales	i) Caudal- características geomorfológicas ii) Caudal- interacciones intra e intersistémicas* iii) Caudal-calidad de las aguas

Fuente: Propia

Tabla 7. Comparación de métodos para determinar un caudal ecológico en relación a aspectos de gestión

Tipo	Aspectos de Gestión		
	Flexibilidad	Complejidad	Costos relativos
Hidrológico			
a) simples	Baja	Baja	Bajos
b) RVA	Alta con precaución	Baja a media	Medios
Hidráulicos	Baja	Baja a media	Bajos a medio
De simulación de hábitat	Baja	Media a alta	Altos
Holísticos	Alta con precaución	Media a alta	Medios a altos

Fuente: King et al., 1999.

6.4. Evaluación de métodos para la estimación de un caudal ecológico

6.4.1. Evaluación de métodos hidrológicos

Con este tipo de método se determinan caudales ecológicos según las probabilidades de ocurrencia de ciertos eventos de sequía o frecuencia de caudales bajos relacionando los mismos con tasas de producción o sobrevivencia de alguna población objetivo; lo cual puede generar dos críticas importantes. Al basarse en resultados estadísticos simples se desconoce el carácter complejo de los sistemas ambientales y la gran incertidumbre que los caracteriza. Por otra parte, los flujos mínimos que ocurren infrecuentemente generan efectos de corto plazo muy diferentes a los efectos de largo plazo que se producen por mantener estos flujos mínimos como constantes en el tiempo.

Desde otro punto de vista, está ampliamente reconocido que no solo la magnitud mínima es un factor limitante para la biota acuática. Cuando se estima un flujo mínimo, indirectamente se desestima la importancia del flujo para mantener la vegetación ripariana y las zonas de inundación. Se dejan de considerar intercambios de materiales y nutrientes que pueden ser importantes, afectando la funcionalidad del ecosistema.

En específico se destaca que los métodos de Curva de Permanencia y Tennant fueron ideados originalmente para conservar poblaciones de peces. En tanto el método ${}_7Q_{10}$ generalmente da cuenta de un caudal mínimo sin tomar en cuenta ningún criterio ecológico. Además, generalmente con este método se estiman caudales inferiores a los calculados por otras técnicas. Así lo muestra un estudio realizado en la Provincia de Québec donde se compararon distintos métodos hidrológicos siendo los resultados más bajos (expresados en volumen de agua) estimados bajo el método ${}_7Q_{10}$ (Belzile et al., 1997). En tanto, en el Sur y el Este de Estados Unidos ha sido utilizado este método tan solo para calcular un caudal de dilución y así evitar el deterioro de la calidad del agua (Reiser et al., 1989).

En lo que respecta a métodos desarrollados en países europeos y establecidos como normas se puede notar que los mismos fueron pensados para determinar

caudales mínimos o residuales, en general centrados en las características propias del régimen hidrológico de cada país para asegurar las actividades relacionadas con la pesca.

Si bien, en términos de gestión, los métodos hidrológicos simples son poco complejos, así como también sus costos relativos son bajos, se piensa que cuando se determina un caudal mínimo sin criterios ecológicos (solo hidrológicos) a largo plazo se puede pagar un precio elevado en medidas de reparación y en la gestión que esto demanda. Por otra parte, desarrollar nuevas metodologías para entender la relación caudal - comportamiento de una población (como el estudio de Tennat) puede ser muy costoso y requerir mucho tiempo (Postel y Richter, 2003). Además, los métodos hidrológicos simples no pueden ser utilizados indistintamente en diferentes tipos de ecosistemas (King et al., 1999).

Por todas estas razones, los métodos hidrológicos simples tienen una evaluación global negativa, en el sentido de que caudales determinados a través de los mismos no garantizan la conservación de ecosistemas lóticos. En la tabla 8 también se muestra que la evaluación cuantitativa de este tipo de método (a través de las preguntas en Materiales y Métodos) arroja el resultado más negativo posible (-4).

En contraposición, se piensa que caudales determinados por el método de RVA pueden contribuir en el desarrollo de los ecosistemas, ya que se estiman caudales variables intentando emular el comportamiento "natural" del flujo hídrico. Si bien no se explicita en el método cómo se toman en cuenta las relaciones intersistémicas para determinar el caudal ecológico, los índices de alteración hidrológica utilizados en este método fueron diseñados en función de éstos y otros factores (Richter et al., 1997).

Sin embargo, se le critica a este método que se encuentra concentrado únicamente en la relación flujo de agua-comportamiento del sistema. Además, las respuestas ecosistémicas ya tipificadas de acuerdo a distintos flujos podrían ser distintas si se consideran los efectos compuestos entre el cambio del flujo natural y los impactos generados por las diversas actividades humanas en los ríos, por ejemplo, la

agricultura. Además no se ha estudiado si las variables del flujo seleccionadas por este método son independientes una de otras (Puckridge et al, 1998) y no se toma en cuenta la calidad del agua necesaria para la mantención del flujo de nutrientes, de materia orgánica, etc.

En término de gestión, se considera positivo que en este método se describan claramente indicadores de éxito. A pesar de que sus costos pueden ser de bajos a medios, es necesario un mayor número de especialistas, mayor esfuerzo de coordinación, así como de conocimientos (mayor complejidad), comparado con métodos hidrológicos simples.

6.4.2. Evaluación de métodos hidráulicos

Estos métodos poseen una suposición simplista, solo una o pocas variables hidráulicas pueden representar adecuadamente el requerimiento de caudal para especies objetivo. Al igual que los métodos hidrológicos simples, se calcula un volumen mínimo como único componente del flujo hídrico que altera el ecosistema. En general, los métodos hidráulicos presentan desventajas similares a los métodos hidrológicos simples (obteniendo la misma evaluación cuantitativa presentada en tabla 8) y según esta evaluación sería inadecuado utilizarlos cuando se pretende mantener la estructura y funcionalidad de los ecosistemas acuáticos.

En específico, cuando al diseñar el método Perímetro Mojado se supone que las características morfológicas son estables y se determina un caudal que optimiza el perímetro mojado de tan solo el cauce primario en relación a la biota acuática, se infiere que es subestimada la importancia de la calidad de las aguas y no se consideran las relaciones íntersistémicas (no se estima un flujo para mantener cauces secundarios o zonas de inundación). Sin embargo, sus costos a corto plazo y complejidad son relativamente bajos.

Por otra parte, se sabe que la relación entre el caudal y el perímetro mojado depende de la forma de los cauces, por lo tanto, si se construye una curva con una

sola sección transversal (como muchas veces se hace) esta puede no ser representativa (Stalnaker, et al., 1995).

6.4.3. Evaluación de métodos de simulación de hábitat

Con este tipo de métodos se pretende conservar poblaciones de peces objetivo, no la estructura y funcionalidad de los ecosistemas. Al recomendar un flujo mínimo desconsidera la importancia de otros elementos del flujo hídrico así como tampoco toma en cuenta los requerimientos para la mantención de la vegetación adyacente. Se asume que algunas variables físicas como tamaño de sustrato, ancho del cauce, etc. son las determinantes en la sobrevivencia de ciertas especies y no se estudian los efectos de los componentes bióticos en el sistema.

En particular, el método IFIM contiene una serie de suposiciones que son criticadas por no ser validadas con estudios empíricos o por no corresponder a la realidad. Entre estas suposiciones se encuentran:

- a. Existe una relación lineal entre las áreas utilizables por especie y la biomasa de peces.
- b. Las únicas variables de preferencia de hábitat para los peces son profundidad, velocidad, sustrato y cobertura vegetal.
- c. Las secciones transversales escogidas para el estudio representan todos los tipos de condiciones de cauces y microhábitat.

En Nueva Zelanda critican fuertemente el uso de este método por el principal hecho de recomendar sólo un flujo mínimo y por todos los inconvenientes que en la práctica se han observado (Hudson et al., 2003). Cuestionan la dificultad de escoger una especie objetivo y de construir sus curvas de adaptación por la falta de conocimientos en el ciclo e historias de vidas de las especies. Finalmente, aclaran que es de suma importancia probar si los índices arrojados corresponden a la realidad, puesto que solo en unos pocos lugares de Estados Unidos se han validado las curvas construidas (Hudson et al., 2003).

Por otra parte, con el método IFIM se han calculado caudales de una magnitud similar a los calculados por métodos más simples y menos costosos, como ha sido demostrado por estudios efectuado por Orth y Leonard (citado en Benetti et al., 2003).

A efectos de esta evaluación la crítica más importante es que con este tipo de métodos se estima un flujo mínimo en función de una o pocas especies de peces, lo cual no aseguraría la conservación de los ecosistemas lóticos. El resultado negativo de la evaluación cuantitativa (-2) reitera esta afirmación.

El método de simulación de hábitat tiene como otra desventaja el ser una técnica costosa. Además como lo afirman Postel y Richter (2003), para poder entender bien la relación entre caudal y poblaciones específicas se requiere de mucho tiempo y los conocimientos adquiridos por estos estudios no pueden ser trasladados de un ecosistema a otro.

6.4.4. Evaluación de métodos holísticos

Estos métodos son evaluados positivamente ya que explícitamente definen un flujo variable para mantener los ecosistemas (también conservar los valores culturales y económicos de los ríos) estimando un caudal en términos de magnitud, duración, y predictibilidad para mantener no solo la biota acuática, si no también la vegetación ripariana y en general las distintas relaciones con las zonas de inundación, comprendiendo además el estudio de la relación entre caudal y la calidad del agua.

Este método se basa además en el conocimiento de expertos de múltiples disciplinas, no solo de hidrólogos. Sin embargo, se aclara que estas aproximaciones se asientan en el juicio de experto y en todo lo que ello significa en términos de subjetividad. El éxito de su utilización dependerá de la experiencia y de los conceptos que los gestores o especialistas manejen en torno a la conservación de los ecosistemas.

En términos de gestión, si bien se considera positivo que sean estos métodos muy flexibles se debe tener cuidado en adoptar valores arrojados por estudios en otros países, o que las recomendaciones en los pasos a seguir se tornen muy rigurosas tomando en cuenta que la base de este método es el juicio de expertos.

Finalmente, la tabla 8 muestra la evaluación de los distintos tipos de métodos de acuerdo a criterios ecológicos (descritos en Materiales y Métodos). Como se observa tan solo los métodos de tipo holístico y el método RVA podrían contribuir en conservar los ecosistemas lóticos. Si bien pueden ser los más costosos a corto plazo y sin duda son más complejos, se piensa que son los más eficaces entre los existentes.

Tabla 8. Evaluación de distintos tipos de métodos para determinar un caudal ecológico

Tipo	Se estima un caudal variable expresado en magnitud, frecuencia, duración, predictibilidad y tasa de cambio	E	El método ha sido diseñado para estimar un caudal que permita la conservación de la estructura y funcionalidad de un ecosistema	E	Los pasos metodológicos consideran la relación entre caudal e interacciones intersistémicas	E	Los pasos metodológicos consideran la estimación de un caudal para mantener la calidad de las aguas	E	Evaluación (E) final
Hidrológico Simple	No, solo se expresa en magnitud mínima	(-1)	No, solo para proteger poblaciones de peces o de otros organismos	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-4)Se determinan caudales mínimos que no contribuyen a la conservación de los ecosistemas
RVA	Si, considerando los 5 elementos del régimen hídrico	(+1)	Si	(+1)	Si, indirectamente	(+1)	No	(-1)	(+2)Se determinan caudales variables que contribuyen en el desarrollo "normal" de los ecosistemas
Hidráulico	No, solo se expresa en magnitud mínima	(-1)	No, solo para proteger poblaciones	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-4)Se determinan caudales mínimos que no contribuyen a la conservación de los ecosistemas
Simulación de Hábitat	No, solo se expresa en magnitud mínima	(-1)	No, solo para proteger poblaciones	(-1)	No	(-1)	Si, pero para permitir la sobrevivencia de peces	(+1)	(-2)Se determinan caudales mínimos que no contribuyen a la conservación de los ecosistemas
Holístico	Parcialmente, considera la magnitud, duración y predictibilidad	(+0,5)	Si	(+1)	Si	(+1)	Si	(+1)	(+3,5)Se determinan caudales variables que contribuyen en la conservación de los ecosistemas

Fuente: Propia

6.5. Aplicación del concepto de caudal ecológico en Chile

La Dirección General de Agua a partir de los años noventa ha encomendado diferentes estudios para determinar los criterios necesarios a la hora de estimar un caudal ecológico antes de otorgar nuevos derechos de agua. En general, se han propuesto caudales mínimos basales para tramos de ríos que no deberían ser desviados del cauce.

Por otra parte, a partir de la entrada en vigencia del reglamento de la Ley 19.300, CONAMA puede exigir formalmente la mantención de un caudal ecológico a todos aquellos proyectos que entran al SEIA y cuya operación implica la variación del flujo natural del agua. Es así como ya siete proyectos en diferentes regiones del país han debido estimar un caudal ecológico de acuerdo con los requisitos u observaciones de los distintos organismos involucrados en el sistema de evaluación.

6.6 Estudios encomendados por DGA

Los primeros estudios proponen emplear métodos de tipo hidrológico simple y los últimos apuntan a la aplicación de métodos de simulación de hábitat para cuantificar caudales ecológicos en ríos de Chile. En el año 2002, la DGA emite un manual de procedimientos generales en el proceso de otorga de nuevos derechos donde se exponen los criterios básicos para determinar un caudal ecológico.

6.6.1 Estudio 1- Caudales ecológicos en Regiones IV, V y Metropolitana

El primer estudio realizado en Chile sobre caudales ecológicos tuvo como objetivo la búsqueda de conocimiento ecológico de los principales ríos de las regiones IV, V y Metropolitana. En base a este conocimiento se propuso “estimar límites razonables” para la extracción del recurso hídrico (R&Q Ingenieros, 1993).

Implícitamente, definen el caudal ecológico como el caudal mínimo que no debe extraerse de los cauces para evitar la eliminación o destrucción de los sistemas de vida asociado a los ríos estudiados.

Para la cuantificación de este caudal mínimo se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- ✓ Caracterización de las áreas estudiadas en términos de su ambiente natural y construido (limitando tramos homogéneos).
- ✓ Selección de indicadores biológicos, hidroquímicos, ambientales e hidrológicos (tabla 9).
- ✓ Evaluación de requerimientos de caudal para los aspectos biológicos, hidroquímicos y ambiental humano (por separado). En esta etapa se determinaron caudales mínimos de acuerdo a las necesidades de oxígeno disuelto, temperatura del agua, velocidad de flujo y profundidad del escurrimiento para los peces seleccionados como indicadores biológicos (caudal físico-biológico mínimo, QI). También se estimó un caudal de dilución (QII, en el cual no se contabilizó en la estimación del caudal ecológico puesto a que según los autores este caudal de dilución debe ser requerido por norma) y un caudal de requerimiento ambiental humano (QIII).
- ✓ Comparación de los requerimientos de caudal para los distintos aspectos biológicos, químicos y ambientales con estadísticas hidrológicas de caudales históricos. En este paso se asoció a cada caudal QI, QII y QIII un caudal histórico comparable. Se consideró como caudal ecológico al valor que satisfacía la mayoría de los aspectos cuantificados. Específicamente para los ríos estudiados en este trabajo el caudal mínimo medio en siete días con periodo de retorno de cinco años (${}_{7}Q_{5}$) resultó ser el más idóneo para satisfacer las necesidades de calidad del agua y condiciones biológicas preestablecidas.

Tabla 9. Indicadores utilizados para la determinación de un caudal ecológico

Indicadores	Justificación de la elección como indicador
<p>Biológico: Peces</p> <p>Bentos, la calidad del agua se estimó a través de indicadores de fauna bentónica</p>	<p>Importancia ecológica Presencia en la mayoría de los tramos Disponibilidad de estudios sobre su biología Sensibilidad a las variaciones de caudal</p> <p>Sensibilidad Tolerancia</p>
<p>Hidroquímicos: CN DBO Coliformes fecales pH CO₂, SO₄ Sólidos suspendidos Cl, Fe, Ni, Cr, Zn</p>	<p>Tipos de contaminantes en la zona de estudio</p>
<p>Ambientales: Valor escénico, turístico y recreacional</p>	<p>Usos ambientales reconocidos de los ríos</p>
<p>Hidrológicos: Cantidad de años de estadística considerada Caudal medio anual Caudales medios mensuales mínimos con probabilidad de excedencia de 50, 80 y 90% Caudales medios diarios mínimos con probabilidad de excedencia 50, 80, 90% Periodo de estiaje Cantidad de años en que se secó el río Rango de duración del periodo de sequedad, en días</p>	<p>Información existente y estudios previos sobre el tema</p>

Fuente: R&Q Consultores, 1993.

6.6.2 Estudio 2- Caudales ecológicos: Caracterización Hidroambiental

Etapas I

En un segundo estudio se fijaron las bases metodológicas generales para determinar cuantitativamente caudales mínimos con el fin de mantener condiciones aceptables en la calidad del agua así como proporcionar hábitats adecuados a la fauna biológica de los cauces. También se caracterizaron las condiciones hidroambientales de ríos de las regiones IX y X (Ayala y Cabrera Ingenieros, 1996).

Explícitamente en este estudio se define un caudal ecológico como un caudal mínimo que permite mantener los problemas ambientales en un nivel aceptable (cuando operan embalses en la zona) o que permite mantener el ecosistema existente sin cambios irreversibles (cuando no existen embalses en la cuenca). Mientras se precisa que una “condición ambiental aceptable” es aquella que permite la conservación de las especies de peces bajo las condiciones de intervención del cauce.

En este contexto los investigadores definen un Caudal Mínimo Admisible (CMA) como aquel que permite condiciones ambientales mínimas para mantener la calidad de las aguas y de este modo la sobrevivencia de los peces y un Caudal Mínimo Hidrológico (CMH) mensual, como un valor de flujo relacionado con los caudales históricos que permitieron el desarrollo de los ecosistemas. Este CMH se planteó como el límite superior del CMA en todos aquellos cauces en que la intervención consista en extracciones de agua y en descargas “leves” de contaminantes. Mientras que para los ríos cuyos vertimientos externos presenten calidades notoriamente inferiores a las propias del flujo natural y el CMH no es suficiente para la adecuada dilución se proponen caudales de mayor magnitud.

Para cuantificar el Caudal Mínimo Hidrológico (una vez que las cuencas se caracterizaron y subdividieron en tramos homogéneos) se compararon los caudales con probabilidad de excedencia de 99%, 98%, 95% y el valor del caudal mínimo medio diario mensual histórico. A partir de esto se observó que los caudales de 98% probabilidad de excedencia son mas representativos o se asemejan más a los

caudales mínimos históricos, por lo cual deducen que serían “mas representativos de la hidrología” de los ríos estudiados.

Finalmente se recomienda estimar un caudal ecológico como un valor mínimo medio diario mensual que permita un adecuado desarrollo de las comunidades propias del río y declaran que el porcentaje de permanencia que se desee conservar dependerá de las condiciones propias de una cuenca. Sin embargo, a grandes rasgos aconsejan cuantificar un Caudal Mínimo Hidrológico según las siguientes fórmulas:

$$CMH = \text{Máx} (Q_{98}, QH), \quad (1)$$

donde CMH sería el mayor valor entre el caudal histórico mínimo (QH) y el asociado a una probabilidad de excedencia del 98%, o

$$CMH = \alpha Q_{98}, \text{ donde} \quad (2)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{si } Q_{98} \geq QH \\ \frac{QH}{Q_{98}} & \text{si } Q_{98} < QH \end{cases}$$

6.6.3 Estudio 3- Análisis de Criterios Hidroambientales en el Manejo de Recursos Hídricos: Pautas para la determinación de caudales ecológicos

El tercer estudio realizado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile tuvo como objetivo la formulación de una metodología simple que permitiera, a través de un conjunto de parámetros, la formulación de criterios generales básicos para su utilización en el manejo de los recursos hídricos (Universidad de Chile ^a, 1998).

En este trabajo se expone que el concepto de caudal ecológico manejado en el vocablo general es: caudal mínimo a mantener en un curso natural después de haberse utilizado el recurso en distintos fines, destinado para asegurar la supervivencia de las especies animales y vegetales del sistema natural. Sin embargo, en sus objetivos definen que estimaran un caudal mínimo ecológico entendiendo el mismo como el caudal necesario para preservar los ecosistemas existentes actualmente y

cuya determinación involucra estadísticas hidrológicas, de calidad de agua y aspectos biológicos.

Para lo mismo se realiza una zonificación climática y biológica de los cuerpos de agua comprendidos entre la IV y X Región, así como su caracterización en términos de grado de intervención del régimen hidrológico y en términos de cantidad de aguas contaminadas arrojadas a estos cauces. Posteriormente, se determinan “caudales ecológicos” según diferentes normas de otros países (como la francesa, la suiza, la española, etc.) y según estadísticas simples como Q_{330} o Q_{337} (ver anexo 1 para entender dicha estadística). Finalmente, para algunas estaciones se establecen los caudales ecológicos comparando los valores arrojados por las distintas normas y las condiciones de los cuerpos de agua. Por ejemplo, para cuencas o ríos que se encuentran en un estado más cercano al natural se establecen caudales ecológicos a través de las metodologías más conservadoras (aquellas que arrojan la mayor magnitud del caudal), mientras que para ríos con condiciones altamente intervenidas o de poca importancia se escogen métodos menos conservadores. Una vez obtenido el caudal ecológico para estaciones puntuales, se propone que un caudal mínimo en cada subdivisión política de un río o en cada tramo considerado se puede obtener a través de un índice de caudal mínimo, $I_{Q_{\min}}$

$$I_{Q_{\min}} = \frac{Q_{ec}}{A_{sc}}, \quad (3)$$

donde Q_{ec} es el caudal ecológico estimado de acuerdo a la norma que corresponda según las condiciones ambientales de la cuenca y A_{sc} es el área de la subcuenca analizada

También se proponen una serie de pasos generales para estimar un caudal ecológico en casos especiales donde se piense se generarán impactos de grandes magnitudes dado el funcionamiento de futuros proyectos de embalses. En estos casos se recomienda recopilar no solo información secundaria sino también complementarla con datos de terreno. Luego, consideran esencial definir organismos indicadores de la cantidad y calidad del agua y estudiar específicamente los impactos aguas abajo que afectarían a dichos indicadores biológicos.

6.6.4 Estudio 4- Análisis de Criterios Hidroambientales en el Manejo de Recursos Hídricos: Diseño de Plan de Monitoreo para la determinación de caudales ecológicos

A diferencia de los estudios anteriores donde se buscó encontrar una aproximación metodológica para determinar cuantitativamente un caudal ecológico, en este trabajo se propuso el estudio de las necesidades de información, variables a registrar y periodos de muestreo destinados a la aplicación de programas de simulación de hábitat entre la IV y X Región del país. El objetivo fundamental fue la evaluación de la implementación de la metodología incremental IFIM para la determinación de caudales mínimos (Universidad de Chile ^b, 1998).

El concepto de caudal ecológico expresado en esta investigación es el siguiente: caudal mínimo necesario para asegurar la supervivencia de un ecosistema acuático preestablecido.

Los resultados de esta investigación muestran una carencia de información tanto de datos hidráulicos, hidrológicos, físicos y químicos, microbiológicos y biológicos. Sin los mismos justifican que hasta el momento se utilicen métodos de tipo hidrológico simple para estimar un caudal ecológico.

Por último, proponen en líneas generales un plan de monitoreo necesario para llevar a cabo una estimación de caudales ecológicos a través de IFIM incluyendo los costos que esto conllevaría y los esfuerzos necesarios en la gestión.

6.6.5 Estudio 5- Análisis de Criterios Hidroambientales en el Manejo de Recursos Hídricos: Monitoreo de una cuenca piloto para la determinación de caudales ecológicos

El objetivo del último estudio hasta ahora encomendado por la DGA (en relación a caudales ecológicos) fue la selección de una cuenca piloto para la aplicación de la metodología IFIM-PHABSIM, la definición de un plan de monitoreo para esta cuenca, la capacitación para la aplicación de esta metodología y sus técnicas de muestreos, la

implementación y ejecución de un programa de monitoreo, la síntesis y análisis de la información recopilada en terreno, la definición de caudales mínimos aconsejables a partir de la metodología IFIM y finalmente el análisis de los resultados generados por el estudio (Universidad de Chile, 2000).

En este trabajo se adopta el mismo concepto de caudal ecológico que en el estudio anterior (ha sido elaborado por el mismo equipo de la Universidad de Chile), se confirma la falta de información esencial para utilizar métodos complejos y se expresa la necesidad de mantener caudales “mínimos o ecológicos” variables que al menos fluctúen cada tres meses dependiendo de la estación del año.

Finalmente se proponen los pasos a seguir para la aplicación de la metodología PHABSIM, como se resumen a continuación:

Etapa 1:

- ✓ Determinar el área de estudio y la metodología de muestreo en terreno
- ✓ Realizar una caracterización hidráulica donde se realice al menos un análisis sedimentológico, se determine la rugosidad (altura, ancho, velocidad del agua) del cauce y la pendiente del escurrimiento.
- ✓ Realizar una caracterización biológica que comprenda la caracterización de la riqueza y abundancia de especies, la selección de bioindicadores o especies claves y la selección de especies objetivos.
- ✓ Llevar a cabo una caracterización física y química de las aguas, seleccionando a priori las variables a estudiar.

Etapa 2:

- ✓ Aplicar modelos para reproducir el comportamiento hidráulico de los cauces.
- ✓ Selección y generación de estadísticas hidrológicas. Se especifica que debiera contarse con al menos 5 años de registro hidrológicos previos al estudio e idealmente con más de 10 años.
- ✓ Elaboración de curvas de habitabilidad representativas de las condiciones de hábitat de la o las especies objetivos.

- ✓ Determinación de un índice de habitabilidad (volumen efectivo que hay disponible para la especie objetivo para distintos caudales pasantes en el cauce)

Etapa 3:

- ✓ Determinación de caudales mínimos aconsejables. Específicamente en este trabajo se estudió el río Liucura (IX Región) y se observó que el caudal estimado como Q_{330} optimizaba el índice de habitabilidad global. Pero se reitera que es de suma importancia determinar caudales variables durante el año.

6.6.6 Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos

A partir de estos trabajos DGA en su “Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos” (2002) establece que el caudal ecológico puede ser determinado ya sea con metodologías que estiman un porcentaje del caudal natural del río o bajo métodos que buscan conocer los requerimientos de caudal específicos para cada “agente usuario” (entre estos agentes mencionan la flora y fauna acuática, la vida humana, etc.).

Este manual tuvo como objetivo disponer de las bases generales que permitieran “definir en forma clara y precisa los principales procedimientos respecto de la forma de efectuar las labores de Administración de Recursos Hídricos, que corresponden dentro de las atribuciones y funciones de la Dirección General de Aguas”.

Explícitamente se expone en este manual que un caudal ecológico puede ser estimado de las siguientes maneras:

Q ecológico= 10 % del caudal medio anual (CAM)

Q ecológico= 50 % del caudal mínimo en el periodo de estiaje con una excedencia del 95% (50% de Q_{95})

Q ecológico= caudal que es excedido al menos 330 días al año (Q_{330})

Q ecológico= caudal que es excedido al menos 347 días al año (Q_{347})

Sin embargo, se le atribuye al gestor regional (en base a sus conocimientos locales y experticia) encontrar la manera idónea de estimar un caudal ecológico. En este contexto se expresa que un gestor en ocasiones especiales puede determinar un “caudal ecológico total” resultado de la suma de la magnitud del caudal ecológico más la demanda ambiental hídrica, siendo esta última definida como “un valor representado por un caudal y sus fluctuaciones para el caso de aguas corrientes, o por un volumen expresado en términos de variación de niveles máximos y mínimos en el caso de las aguas detenidas, o expresado en el descenso de niveles de las aguas subterráneas que estén directamente relacionadas con humedales”.

Esta demanda ambiental se exige formalmente cuando se solicitan derechos de aprovechamiento de aguas en áreas que comprometen o que integran el SNASPE, de otra forma, la manera más común de determinar un caudal ecológico para resolver solicitudes de derechos de aprovechamiento (fuera de estas áreas protegidas) ha sido a través de la estimación del diez por ciento del caudal medio anual (DGA, 1999, Davis y Riestra, 2002).

Por otra parte, en las modificaciones al Código de Aguas se establece una cota máxima al caudal ecológico (no así una cota mínima como en la mayoría de los casos en otros países) donde el caudal ecológico mínimo no puede ser superior al veinte por ciento del caudal medio anual (CAM) de la fuente superficial y solo en casos especiales se puede autorizar a conservar caudales ecológicos hasta volúmenes no superiores al cuarenta por ciento del CAM (Oficio n^{ro} 5524, 2005).

6.7 Evaluación de los estudios encargados por DGA en Chile para estimar caudales ecológicos

En la tabla 10 se presenta un resumen de los trabajos realizados y posteriormente en tabla 11 y 12 la evaluación de los conceptos de caudal ecológico adoptados en los diferentes estudios y la evaluación de las metodologías de cuantificación de este caudal recomendadas en los mismos.

En todos los trabajos se define el caudal ecológico como un caudal mínimo de agua, así como en ninguno de estos se especifica la importancia de mantener el flujo de entrada de energía al sistema a través de la mantención de flujos intersistémicos. De esto resulta que todos estos trabajos estén evaluados negativamente. Sin embargo, en los tres últimos de ellos realizados por la Universidad de Chile y en el Manual de Procedimientos de DGA se explicita en el concepto de caudal ecológico el objetivo de conservar a nivel de ecosistema, lo cual le otorga a estos trabajos una evaluación menos negativa. Sin embargo, en contraposición a lo expresado con el objetivo de conservación del concepto, todos los estudios proponen métodos que determinan un caudal invariable y mínimo en base al estudio de los requerimientos físicos y químicos para poblaciones de peces (exclusivamente). Según estos estudios, el caudal es considerado como un factor (no un componente) que afecta poblaciones y según los mismos, el mejor indicador biológico de los ríos sería la población de peces ya que estos se encuentran en la última posición de la trama trófica y por lo tanto reflejan el estado de las otras poblaciones de las cuales dependen. También se ha expresado que estos organismos son los más sensibles a un aumento en la concentración de algún contaminante en el agua.

Como se explicitó en revisión bibliográfica sobre la conservación a nivel de ecosistemas, es difícil que a través del entendimiento del comportamiento de un solo componente (en este caso los organismos, específicamente poblaciones de peces o bien la columna de agua) pueda predecirse la conservación de la estructura y funcionamiento de todo el ecosistema. Y si fuera necesario utilizar ciertos organismos como indicadores de un determinado ecosistema lótico, muchas investigaciones muestran que microorganismos (los cuales hacen disponible nutrientes a otros animales de la cadena trófica) así como la meiofauna en intersticios (animales no lo suficientemente grandes para ser denominados como macroinvertebrados o lo suficientemente pequeños como para considerarlos microorganismos) contribuyen significativamente al total de la productividad y al flujo de la energía en ecosistemas lóticos (más que organismos depredadores como los peces). Por ejemplo, en ríos como Goose Creek estudiado en el Estado de Texas (caracterizado por una alta abundancia de meiofauna y por poseer un sustrato arenoso), se piensa que la

meiofauna de intersticios contribuye en gran medida a aumentar la disponibilidad de recursos para otras especies modificando las condiciones de hábitat, estimulando la tasa de crecimiento bacterial y la dinámica de intercambio de nutrientes, por lo cual este tipo de organismos podría servir mejor como un bioindicador del estado de un ecosistema estudiado (Ward et al., 1998, Hakenkamp y Morin, 2000).

Finalmente, a pesar de los estudios realizados o encomendados por la DGA y las últimas tentativas de potenciar el uso de métodos de simulación de hábitat, la DGA declara que el criterio más frecuentemente utilizado para cuantificar un caudal ecológico (cuando no están involucrados proyectos de gran envergadura) es determinar el 10% del caudal medio anual del tramo del cauce del cual se piden nuevos derechos. Pareciera entonces que se toman en cuenta las recomendaciones dadas por Tennant o por la legislación francesa. Sin embargo, las recomendaciones del método de Tennant fueron pensadas para mantener el hábitat de peces (no la mantención del ecosistema) y bajo condiciones hidrológicas y geográficas particulares del norte y centro de Estados Unidos. Mientras, al menos un estudio muestra que existen diferencias importantes entre los ecosistemas lóticos de cabecera de bosques templados del hemisferio Norte con los ecosistemas lóticos centrales de Chile, debido principalmente a las altas pendientes de los ríos que estos últimos presentan (Contreras, 1998).

Tabla 10. Estudios encomendados por DGA para la determinación de un caudal ecológico en la instancia de otorga de nuevos derechos de agua

Estudios	Objetivo	Concepto de caudal ecológico	Metodología propuesta
1- R&Q (1993)	Búsqueda de conocimiento ecológico de los principales ríos de las regiones IV, V y Metropolitana. Estimar "límites razonables para la extracción del recurso hídrico"	Caudal mínimo que no debe extraerse de los cauces para evitar la eliminación o destrucción de los sistemas de vida asociado a los ríos estudiados	Comparación de los requerimientos de caudal para los distintos aspectos biológicos, químicos y ambientales con estadísticas hidrológicas de caudales históricos
2- Ayala y Cabrera (1996)	Fijar las bases metodológicas para determinar cuantitativamente caudales mínimos	Caudal mínimo que permite mantener los problemas ambientales en un nivel aceptable (cuando operan embalses en la zona) o que permite mantener el ecosistema existente sin cambios irreversibles (cuando no existen embalses en la cuenca).	Comparación de los caudales con probabilidad de excedencia 99%, 98%, 95% y el valor del caudal mínimo medio diario mensual histórico.
3- Universidad de Chile^a (1998).	Formulación de una metodología simple de estimación de caudales que permita la presentar criterios para su utilización en el manejo de los recursos hídricos	Caudal mínimo ecológico es el caudal necesario para preservar los ecosistemas existentes actualmente	Comparación de valores arrojados de caudal por las distintas normas y métodos hidrológicos con las condiciones de los cuerpos de agua estudiados
4- Universidad de Chile^b (1998)	Estudio de las necesidades de información para la aplicación de programas de simulación de hábitat entre la IV y X Región	Caudal mínimo necesario para asegurar la supervivencia de un ecosistema acuático preestablecido	IFIM-PHABSIM
5-Universidad de Chile (2000)	Selección de una cuenca piloto para la aplicación de la metodología IFIM-PHABSIM.	Caudal mínimo necesario para asegurar la supervivencia de un ecosistema acuático preestablecido	IFIM-PHABSIM
DGA (2002)	Definir los principales procedimientos respecto la forma de efectuar las labores de la administración de los recursos hídricos	Caudal mínimo que debieran tener los ríos para mantener los ecosistemas presentes, preservando la calidad ecológica	De tipo hidrológico simple.

Fuente: Propia

Tabla 11. Evaluación de los conceptos de caudal ecológico en estudios encomendados por DGA

Estudio	¿El caudal ecológico es definido en términos de distintas magnitudes de flujo?	E	¿El caudal ecológico es definido para conservar a un nivel ecosistémico?	E	¿El caudal ecológico es definido para mantener relaciones intersistémicas?	E	Evaluación (E) final
1- R&Q (1993)	No, solo se define como un flujo mínimo	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-3) Negativa. El caudal ecológico es definido como un caudal mínimo para mantener poblaciones de peces
2- Ayala y Cabrera (1996)	No, solo se define como un flujo mínimo	(-1)	Si, pero solo cuando no existen embalses en la zona	(+0,5)	No	(-1)	(-1, 5) Negativa. El caudal ecológico es definido como un caudal mínimo
3- Universidad de Chile¹ (1998)	No, solo se define como un flujo mínimo	(-1)	Si	(+1)	No	(-1)	(-1) Negativa. A pesar de que el caudal ecológico ha sido definido para conservar los ecosistemas, al conceptualizarlo como un caudal mínimo no se mantendría el desarrollo "normal" de los ecosistemas
4- Universidad de Chile² (1998)	No, solo se define como un flujo mínimo	(-1)	Si	(+1)	No	(-1)	(-1) Negativa. Definen el caudal ecológico como un flujo mínimo
5- Universidad de Chile (2000)	No, solo se define como un flujo mínimo pero declaran la importancia de la variabilidad	(-1)	Si	(+1)	No	(-1)	(-1) Negativa. Definen el caudal ecológico como un flujo mínimo
6- DGA (2002)	No, solo se define como un flujo mínimo	(-1)	Si	(+1)	No	(-1)	(-1) Negativa. Definen el caudal ecológico como un flujo mínimo

Fuente: Propia

Tabla 12. Evaluación de las metodologías propuestas en estudios encomendados por DGA

Estudio	Se estima un caudal variable expresado en magnitud, frecuencia, duración, predictibilidad y tasa de cambio	E	Se estima un caudal que permita la conservación de la estructura y funcionalidad de un ecosistema	E	Los pasos metodológicos consideran la relación entre caudal e interacciones inter sistémicas	E	Los pasos metodológicos consideran la estimación de un caudal para mantener la calidad de las aguas	E	Evaluación (E) Final
1- R & Q (1993)	No	(-1)	No, para conservar especies de peces	(-1)	No	(-1)	Si	(+1)	(-2) Se determinan caudales mínimos que no contribuyen a la conservación de los ecosistemas
2- Ayala y Cabrera (1996)	No, pero se propone que se estime un CMH mensual	(-1)	No, para la conservación de especies piscícolas	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-4) Se determinan caudales mínimos que no contribuyen a la conservación de los ecosistemas
3- Universidad de Chile ¹ (1998)	No	(-1)	No, para conservar ciertas condiciones ambientales de los tramos estudiados	(-1)	No	(-1)	Si, pero solo en casos especiales	+0,5	(-2,5) Se determinan caudales mínimos que no contribuyen a la conservación de los ecosistemas
4- Universidad de Chile ² (1998)	No	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	Si	(+1)	(-2) Se determinaría un caudal mínimo para mantener poblaciones de peces objetivo
5- Universidad de Chile (2000)	No, pero proponen que se estimen caudales variables por estación	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	Si	(+1)	(-2) Se determina un caudal mínimo para mantener poblaciones de peces objetivo
6- DGA (2002)	No	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-4) Se determinan caudales mínimos que no contribuyen a la conservación de los ecosistemas

Fuente: Propia

6.8 Estimación de caudales ecológicos en Estudios de Impacto Ambiental de Chile

Dentro del SEIA aún no se encuentran estipulados los criterios a seguir por el particular para determinar un caudal ecológico y es el titular quien debe proponer una forma de determinación del caudal. Luego, el caudal que se requiere para el proyecto y el caudal que se propone como ecológico deben ser aprobado por la DGA en el proceso de la evaluación de impactos.

A continuación, los 7 proyectos ingresados al SEIA a partir de 1997 (también en anexo 2 pueden revisarse las fichas de cada proyecto) se presentan en orden cronológico (desde el primer proyecto que entra en el sistema hasta el más reciente) para así reconocer algún tipo de avance en el tiempo.

6.8.1 Central Hidroeléctrica Lago Atravesado y caudal ecológico

El proyecto tiene como objetivo aumentar la capacidad de generación y potencia eléctrica del Sistema Aysén. Para ello proponen aprovechar el potencial energético representado por un desnivel promedio de 66 metros existente entre el Lago Atravesado y Elizalde y el caudal efluente del Lago Atravesado, de un promedio anual aproximado de 11 m³/s, generando una energía media anual de unos 50 GWh en la XI Región comuna de Coyhaique (RCA N° 017, 2000).

Según los titulares, al momento de ingresar en el SEIA (en 1998) los principales impactos negativos generados por este proyecto serían el aumento de ruido durante la construcción, la disminución del caudal del desagüe del Lago Atravesado y la fluctuación del nivel de este último durante la etapa de operación, lo cual alteraría la fauna íctica y su hábitat en el Lago Atravesado, entre otros impactos.

Sin embargo, en la línea base se determina que el tramo afectado por el desagüe del Lago Atravesado que entrega sus caudales al Lago Elizalde era de corta extensión y no contaba con vida piscícola debido al tipo de sustrato del río y a su gran pendiente. Por lo tanto, se estimó que la operación de la Central no generaría como impacto la

pérdida de hábitat para la fauna íctica, por lo cual tampoco sería necesario mantener un caudal ecológico para mitigar tal efecto negativo. Sin embargo, se consideró que la alteración del flujo podría modificar la cascada generada entre los dos lagos afectando la importancia paisajística y turística que esta cascada presentaba (según comunicación personal con Francisco Riestra, Director Regional de DGA XI Región). Por tal motivo, en la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) se establece que debe mantenerse un caudal ecológico de al menos 1,0 m³/s (RCA N^o 017, 2000). Sin embargo, la manera de cómo este caudal fue determinado no es explicada, solo se señala que se realizaron análisis estadísticos en base a los datos sobre caudales observados acreditados por el proponente ante la Comisión Regional del Medio Ambiente para el período comprendido entre 1979 y 1997.

Finalmente, una vez en operación la Central, se ha observado que si bien el caudal ecológico no permite mantener la cascada en su forma original por lo menos se mantiene un flujo constante de agua, el cual aumenta conforme la operación de la Central y la apertura de las compuertas (según comunicación personal con Francisco Riestra, Director Regional de DGA, XI Región).

Este proyecto sería el único caso donde se propone un caudal ecológico con la finalidad de conservar la calidad del paisaje. Se resalta también de este proyecto que la ausencia de peces en el tramo afectado por la modificación del régimen hídrico sea el criterio para no determinar un caudal ecológico que pueda contribuir en el desarrollo “normal” del ecosistema. Sin embargo, también esta decisión pudo deberse a que el tramo afectado es muy corto por lo cual infirieron que no se alteraría en gran medida el ecosistema.

6.8.2 Embalse Corrales y caudal ecológico

El proyecto “Embalse Corrales” estimaba la construcción de un embalse con capacidad de 50 millones de metros cúbicos comprendiendo 270 há. de superficie y a ser localizado en la IV Región (comuna de Salamanca) en la zona superior del cauce del estero Camisas, en su confluencia con el estero El Durazno. Se propuso mantener este embalse con aportes de agua del río Choapa a través de una bocatoma

alimentadora y de esta manera incrementar en un 35% la seguridad de riego para una superficie de 10.872 há. de terrenos agrícolas insertos en la cuenca conformada por este río y otros (Resumen Ejecutivo, 1998).

Dado a que se extraerían aguas del río Choapa se pensó que esto generaría un impacto en la flora acuática y la fauna íctica por lo cual proponen mantener un caudal ecológico en este río. Para su determinación recurren a estudios previos realizados por la consultora R & Q Ingenieros (1993) donde se determinaron los requerimientos de caudal ecológico de los principales ríos chilenos pensados para sostener el hábitat de ciertas especies de peces. En particular, para el río Choapa se tomó en cuenta los requerimientos para especies de trucha y pejerrey del norte y se recomendaron caudales biológicos y ambientales para el mismo tomando en cuenta variables como temperatura, oxígeno, velocidad y profundidad del caudal (tabla 13).

Tabla 13. Estimación de caudales biológicos y ambientales (m³/s) para el río Choapa aguas arriba Junta río Illapel

Caudal biológico				Caudal Ambiental	
Q1	Q2	Q3	Q4	QI	QII
0,043	0,3	0,06	0,1	0,35	0,1
Q1	Caudal necesario para suplir el consumo de oxígeno disuelto en una población mínima de 1000 peces				
Q2	Caudal estimados asociado a temperatura crítica para peces				
Q3	Caudal asociado a la velocidad de flujo mínima requerida por las especies				
Q4	Caudal asociado a alturas mínimas de agua para la movilización de las especies				
QI	Caudal físico-biológico mínimo recomendado (resumen de todos los criterios)				
QII	Caudal para dilución de desechos (no incluido como parte del caudal ecológico)				

Fuente: R&Q , 1993, citado en Addendum II de Proyecto Embalse Corrales (Anexo C)

A partir de este estudio determinan que el río Choapa no debe tener un caudal menor que 0,35 m³/s correspondiente al caudal ambiental QI. Sin embargo, reconocen la importancia de las variaciones estacionales del caudal y establecen que el caudal ecológico debe ser equivalente a 0,2 veces el caudal mínimo diario por período mensual registrado (siendo los valores mínimos a entregar los que se indican en la tabla 14)

respetando que para todos los meses debe mantenerse al menos 0,35 m³/s (Addendum II y RCA de Proyecto Embalse Corrales, 1999).

En el caso del estero Camisas que también se vería afectado por el funcionamiento del embalse, se determina que, por ser este un estero de curso intermitente con un caudal mínimo promedio anual de 0,005 m³/s (estimado a través de modelaciones) y alcanzando un caudal promedio en Agosto (el más caudaloso) de 0,004 m³/s, se debe descargar al mismo el caudal pasante en este, aguas arriba de la cota máxima de inundación del embalse, excepto cuando este caudal supere los 0,5 m³/s, es decir, el embalse retornaría al estero todos los caudales diarios detectados bajo este valor, guardando caudales superiores en su cubeta.

Tabla 14. Caudales ecológicos mensuales, Proyecto Embalse Corrales

Caudal Ecológico	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
m³/seg	0,35	0,35	0,36	0,35	0,35	0,52	0,54	0,49	0,72	0,59	0,39	0,35

Fuente: RCA de “Embalse Corrales” (1999).

El embalse Corrales se encuentra en funcionamiento parcial desde aproximadamente el año 2001 pero no se ha puesto en marcha la bocatoma que traspasaría las aguas del Río Choapa al estero Durazno y posteriormente al embalse. Por lo tanto, hasta el momento no se pueden estudiar las consecuencias de mantener un cierto caudal ecológico en el río Choapa.

6.8.3 Central Hidroeléctrica Quilleco y caudal ecológico

Esta central de pasada se ubicaría en la Región del Bio Bio, en la comuna de Quilleco, a unos 35 km. al oriente de la ciudad de Los Ángeles. Su funcionamiento estaría en serie hidráulica con la Central Rucúe, utilizando los caudales generados por esta Central y restituyendo las aguas unos 8 km. aguas abajo del punto de captación. De esta manera, la Central de Quilleco aportaría al Sistema Interconectado Central 422 GW anualmente (Resumen Ejecutivo, 1998).

Según el titular, el funcionamiento de esta central impactaría la fauna acuática y el componente ambiental agua, por lo que se propuso mantener un caudal mínimo de sostenimiento ecológico en el brazo sur del río Laja en los primeros 2 km desde la junta con el río Rucúe, por cuanto este tramo estaría directamente afectado por la disminución de las descargas de la central Rucúe al entrar en operación la central Quilleco.

Para la determinación de este caudal de sostenimiento se utilizó por primera y única vez en Chile la metodología IFIM. Para ello se realizaron campañas de terreno y se estudiaron 5 secciones transversales del área crítica (brazo sur del río Laja). Posteriormente, se construyeron curvas relacionando el caudal con el área utilizable ponderada para las tres especies de peces más observadas en el área, en sus estados juvenil (-j) y adulto (-a) (figura 7) (a pesar de que en un principio se pensó también estudiar los requerimientos de flujo para productores y consumidores primarios). En este sentido, se determinó que la fauna de peces característica correspondía al ensamble compuesto por *Trichomycterus areolatus* (Ta) y *Oncorhynchus mykiss* (Om). Sin embargo, para el análisis también consideraron la especie *Diplomystes nahuelbutaensis* (Dn) encontrada ocasionalmente en el muestreo de los tramos estudiados.

Luego de la obtención de estas curvas, los consultores intentan responder lo siguiente: a partir de los caudales observados antes de la instalación de la central (50 m³/s), “¿cuál es el menor caudal que mantiene y/o mejora los hábitats actuales (medidos como el porcentaje de área utilizable ponderada)?”

De esa manera, se determinó que un caudal de 6 m³/s en el área crítica del río mantenía o mejoraba las condiciones de hábitat de todas las especies y comunidades presentes.

Finalmente, la Resolución exenta número 23, que modifica la RCA de este proyecto, estipula que la distribución espacial de los caudales esperados a observar sería la

mostrada en tabla 15, donde el titular debe garantizar al menos seis metros cúbicos por segundo de agua fluyendo en el brazo sur del río Laja.

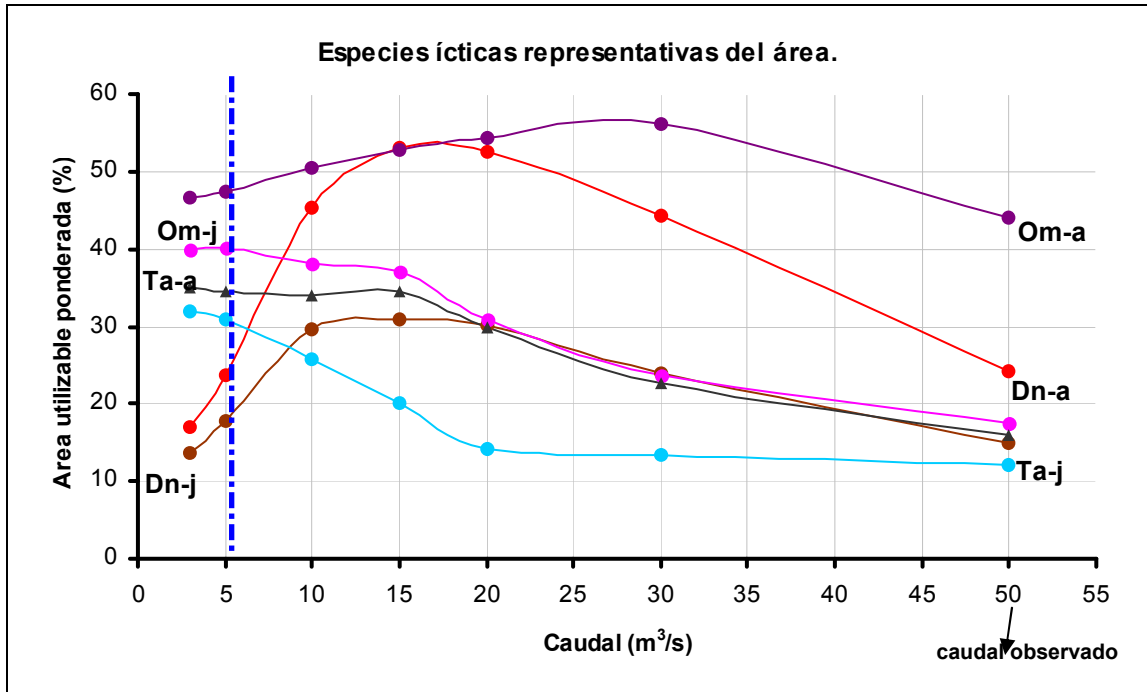


Figura 7. Relación caudal –área utilizable ponderada para tres especies de peces en brazo sur de Río Laja.

Fuente: Centro EULA –Chile, 1999. Estudio para la determinación de un caudal mínimo ecológico.

Tabla 15. Caudales ecológicos anuales aceptados por DGA para Central Hidroeléctrica Quilleco

Tramos de río o brazo	Caudal
Río Laja antes de la junta con el río Rucúe.....	> 17 m ³ /s
Río Laja después de la junta con el río Rucúe (incluido el brazo sur) hasta la devolución de la central Quilleco.....	> 17 m ³ /s
Brazo sur del río Laja, desde junta con río Rucúe hasta 2 km aguas abajo de este punto.....	> 6 m³/s
Brazo sur del río Laja, desde 2 km aguas abajo de junta con río Rucúe hacia aguas abajo.....	> 13 m ³ /s
Río Rucúe hasta junta con brazo sur del río Laja.....	0,46 m ³ /s

Fuente: Resolución exenta número 23 de Central Hidroeléctrica Quilleco, 2000

6.8.4 Embalse Illapel y caudal ecológico

El proyecto “Embalse Illapel” fue diseñado con el propósito de ofrecer una alternativa técnica y económicamente conveniente para aumentar la seguridad de riego a agricultores en las proximidades del río Illapel (IV Región de Coquimbo). En específico, este embalse se emplazaría aproximadamente 30 Km. Al oriente de la ciudad de Illapel con un volumen útil de almacenamiento de de 25,5 millones de metros cúbicos de agua, alcanzando un área de inundación cerca de 120 há (Resumen Ejecutivo, 1999). Sin embargo, este proyecto aún no se concretiza.

En la RCA de este proyecto se determina que durante la operación debe entregarse un caudal permanente al río Bato aguas abajo del embalse para así conservar las condiciones de hábitat propia de este río (aunque no se especifica en relación a cuáles organismos). De esta manera se estimó que el caudal ecológico debía ser al menos igual al caudal con 90% de probabilidad de excedencia (0.3 m³/s). Sin embargo, para la distribución mensual se asume el caudal ecológico como el 70% de Q₉₀ del mes (tabla 16). Mientras, los criterios de tales determinaciones no se encuentran expuestos, se justifica la utilización de un método hidrológico simple por la alta intervención antrópica del río Illapel.

Tabla 16. Caudales ecológicos definidos a pie del Embalse Illapel

Mes	Distribución mensual Q ₉₀ (m ³ /s)	Caudal ecológico en El Bato (m ³ /s)
Abril	0.300	0.300
Mayo	0.300	0.300
Junio	0.360	0.300
Julio	0.390	0.300
Agosto	0.420	0.300
Septiembre	0.600	0.420
Octubre	0.780	0.546
Noviembre	1.170	0.819
Diciembre	1.200	0.840
Enero	0.690	0.483
Febrero	0.420	0.300
Marzo	0.300	0.300
Promedio	0.578	0.434

Fuente: Anexo 2, Addendum II del Estudio de Impacto Ambiental, 1999.

6.8.5 Proyecto Hidroeléctrico La Higuera y caudal ecológico

El proyecto contempla el aprovechamiento hidroeléctrico de la cuenca de los ríos Del Azufre y Portillo y de la cuenca alta del río Tinguiririca, construyéndose dos centrales de tipo “de pasada” La Higuera y Confluencia que aportarían en total 300 MW al Sistema Interconectado Central. Las centrales se ubicarían en la ribera sur del río Tinguiririca a 60 Km al este de la ciudad de San Fernando en la Provincia de Colchagua (VI Región) (Resumen Ejecutivo, 2004).

Estas centrales suponen una disminución de los caudales y, como lo declaran, esto alteraría el hábitat para flora acuática y fauna íctica. Como una medida de mitigación proponen entregar un caudal ecológico para los ríos Tinguiririca, Azufre y afluentes con el objetivo de “disponer de un régimen de caudales capaz de mantener el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial en condiciones similares a las naturales”. Sin embargo, proponen un caudal anual constante y determinado según criterios estrictamente hidrológicos (Addendum III, 2004).

En una primera etapa para la proposición del caudal ecológico se determinaron los valores de los caudales mínimos según la legislación Francesa, Suiza y los criterios desarrollados por Ayala y Cabrera (1994) (tabla 17).

Tabla 17. Caudales ecológicos anuales (m³/s) estimados según distintas metodologías. Proyecto Hidroeléctrico La Higuera

CUENCA	L Francesa	L. Suiza	A y C *
Rio Tinguiririca Bajo Junta	3.56	2.20	3.48
Rio Tinguiririca Sobre Junta	1.58	0.98	1.55
Rio Azufre en Junta Tinguiririca	1.97	1.22	1.93
Rio Tinguiririca Cota 1095	1.57	0.97	1.53
Azufre Cota 1098	1.96	1.21	1.92
Los Helados Cota 1105	0.12	0.07	0.12
Rio Tinguiririca Cota 1425	1.16	0.72	1.13
Azufre Cota 1424	0.27	0.17	0.27
Portillo Cota 1438	1.18	0.73	1.15
La Gloria Cota 1436	0.07	0.04	0.07
Riquelme Cota 1498	0.08	0.05	0.07
El Ciruelo Cota 1450	0.03	0.02	0.03

Fuente: Addendum III, tabla 1.1, Proyecto Hidroeléctrico La Higuera, 2004.

*** A y C = Criterios de Ayala y Cabrera.**

En una segunda etapa se calculan diferentes caudales después de otorgarle distinta ponderación a los resultados de los tres métodos, como se indica a continuación:

- a) Caudal ecológico = promedio aritmético de los resultados de norma francesa, Suiza y A y C
- b) Caudal ecológico =15% Francesa + 40 % Suiza + 45% AyC (tabla 21)
- c) Caudal ecológico =20% Francesa + 30 % Suiza + 50% AyC
- d) Caudal ecológico =15% Francesa + 50 % Suiza + 35% AyC
- e) Caudal ecológico =20% Francesa + 40 % Suiza + 40% AyC
- f) Caudal ecológico =10% Francesa + 40 % Suiza + 50% AyC

Tabla 18. Caudales ecológicos anuales (m³/s) estimados a partir de la ponderación de tres metodologías (caso b). Proyecto Hidroeléctrico La Higuera

CUENCA	Legislación			Qecológico	
	15% Francesa	40% Suiza	45% AyC	Calculado	Adoptado
Rio Tinguiririca Bajo Junta	0.53	0.88	1.57	2.98	3.00
Rio Tinguiririca Sobre Junta	0.24	0.39	0.70	1.33	1.34
Rio Azufre en Junta Tinguiririca	0.30	0.49	0.87	1.65	1.66
Rio Tinguiririca Cota 1095	0.24	0.39	0.69	1.31	1.32
Azufre Cota 1098	0.29	0.48	0.86	1.64	1.65
Los Helados Cota 1105	0.02	0.03	0.05	0.10	0.10
Rio Tinguiririca Cota 1425	0.17	0.29	0.51	0.97	1.00
Azufre Cota 1424	0.04	0.07	0.12	0.23	0.24
Portillo Cota 1438	0.18	0.29	0.52	0.99	1.02
La Gloria Cota 1436	0.01	0.02	0.03	0.06	0.06
Riquelme Cota 1498	0.01	0.02	0.03	0.06	0.07
El Ciruelo Cota 1450	0.005	0.01	0.01	0.03	0.03

Fuente: Addendum III, tabla 1.2, Proyecto Hidroeléctrico La Higuera, 2004

Finalmente, el caudal ecológico adoptado para cada tramo afectado sería el resultado del promedio aritmético de los caudales resultantes de a, b, c, d, e y f. A pesar de que justifican este procedimiento declarando que se “potencian aquellos factores que mejor se representan en la zona en estudio” y también destacan que en un solo caso los valores adoptados son inferiores a los calculados por las diferentes formas de ponderar, finalmente no se explica como llegan a los resultados definitivos y tampoco se presenta la justificación de las ponderaciones dadas.

A pesar de diversas observaciones y críticas en el proceso de evaluación, finalmente DGA aprueba lo siguiente:

Tabla 19. Caudales ecológicos anuales aceptados por DGA para Proyecto Hidroeléctrico La Higuera

Bocatoma	Coord. UTM Norte	Coord. UTM Este	Q ecológico m ³ /seg
CENTRAL LA HIGUERA			
Los Helados	6.145.969	357.697	0,10
Azufre	6.145.345	358.732	1,65
Tinguiririca	6.144.129	358.162	1,32
CENTRAL CONFLUENCIA			
Portillo	6.151.677	367.502	1,02
Del Azufre	6.148.359	365.627	0,24
Tinguiririca	6.136.156	361.722	1,00

Fuente: Addendum III de Proyecto Hidroeléctrico La Higuera, 2004

6.8.6 Central Hidroeléctrica Río Licán y caudal ecológico

Esta central de pasada también contribuiría al Sistema Interconectado Central con aproximadamente 10 MW de potencia, ubicándose en la sección inferior de la cuenca del río Licán, aproximadamente a 30 Km al nor- oriente de la ciudad Entrelagos en la Décima Región.

El proyecto de esta Central ingresa al SEIA en 2004 declarando en el mismo que la central implica la disminución de los caudales dada la extracción de agua en sus bocatomas y la posterior liberación de las aguas kilómetros más abajo de la cuenca, con lo cual (según el titular) se podría alterar el hábitat para la flora y fauna acuática. Es así como en el Estudio de Impacto Ambiental proponen entregar un caudal mínimo o ecológico que permita la sobrevivencia de las especies “aún así se reduzca el hábitat disponible” (Resumen Ejecutivo, 2004).

Para determinar este caudal ecológico y cuáles serían las secciones en que se mantendría se estudiaron las especies de peces existentes en los tramos afectados y se identificó cuales eran sus estados de conservación y su importancia para la pesca. Es así como en un tramo desde la bocatoma principal hasta una cascada cercana se desestima el valor de mantener un caudal ecológico ya que se observaron especies de

truchas introducidas en una zona además poco accesible para la pesca deportiva. Mientras que desde ese punto de la cascada hasta la posterior restitución de las aguas observaron la presencia de especies con problemas de conservación y sensibles a la disminución de los caudales, por lo cual finalmente estimaron mantener un caudal igual a 750 l/s (RCA de Central hidroeléctrica Río Licán, 2004). En principio se compararon los valores caudales mínimos estimados a través de la norma Suiza, de la legislación francesa y asturiana, del método de Tennant y según los criterios de DGA en su manual de procedimientos. Finalmente, se acordó un valor cercano al promedio de los resultados arrojados por estas aproximaciones (según comunicación directa con Alejandro Burgos, representante de DGA X Región y según GESAM consultores, 2004).

En cuanto a la alteración del hábitat para la flora acuática el titular considera que la disminución de los caudales generaría un impacto positivo sobre la misma ya que aumentaría su capacidad de asentamiento.

Finalmente declaran que la mantención de este caudal mínimo mantendría las condiciones ecológicas del Río Licán, sin embargo, estiman un caudal constante para todo el año basados únicamente en información hidrológica. Por otra parte, desconocen u omiten los efectos que causaría un aumento de la flora acuática en toda la cadena trófica.

6.8.7 Convento Viejo Etapa II y caudal ecológico

Este proyecto que se presenta al SEIA en 2004 consiste en la ampliación del embalse para riego Convento Viejo Etapa I para así aumentar la presa principal de 16,5 m a 32 m de altura, incrementando el volumen de acumulación de 27 millones metros cúbicos a 237 millones y aumentando la superficie de inundación en aproximadamente 2. 400 há., lo cual afectaría la cuenca del estero Chimbarongo de la Provincia de Colchagua (VI Región) (Resumen Ejecutivo, 2004).

En la descripción de impactos de este proyecto señalan que una disminución de caudales afecta la distribución de las poblaciones que “en casos extremos pierden continuidad de desplazamiento” mientras que un aumento del caudal produce una perturbación negativa para las poblaciones bentónicas, lo que se traduce en una disminución de su abundancia. A pesar de que en reiteradas ocasiones se le resta importancia al impacto de la ampliación del embalse porque ya su funcionamiento previo habría causado un deterioro en el hábitat se propone entregar al estero Chimbarango un “caudal mínimo ecológico”. El mismo fue estimado después de la comparación de los resultados alcanzados por diferentes métodos hidrológicos.

En primera instancia se determinó el valor del 10 por ciento del caudal medio anual y el valor correspondiente al 50 por ciento del caudal en el periodo de estiaje con una excedencia del 95 por ciento (como lo propone DGA en su manual para los procedimientos de otorga). Posteriormente, basados en el método de Tennant establecen que el caudal que debería ser entregado corresponde al 10% del CAM ya que el estero Chimbarongo muestra un estado de conservación “pobre” dada la regulación anterior del caudal por la operación del embalse Convento Viejo Etapa I. Finalmente deciden tomar el valor arrojado por este último razonamiento y el caudal que siempre deben entregar al estero es igual a 4,2 m³/s (RCA para Convento Viejo Etapa II, 2004). Cabe destacar que para el cálculo se utilizaron los caudales medios mensuales registrados durante los 8 últimos años cuando ya estaba instalada la primera etapa del embalse (no sometida al SEIA).

6.9. Evaluación del proceso de estimación de caudales ecológicos en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

En la tabla 20 se muestran los diferentes proyectos que han ingresado al SEIA, destacando el impacto por el cual proponen establecer un caudal ecológico y los objetivos que esperan alcanzar manteniendo este caudal. Para ello, se transcribe textualmente lo establecido en RCAs o Estudios de Impactos Ambiental.

Se puede advertir que en dos casos se utiliza el término caudal mínimo ecológico y en otro se refieren a un “caudal mínimo o ecológico”, mientras tres de los proyectos expresan que sus impactos tan solo se deben a la disminución del caudal. Esto mostraría que la preocupación fundamental hasta el momento en Chile se limita a la disminución de magnitud del caudal y se desestiman o ignoran los efectos que un embalse causa en el régimen hidrológico y cómo el embalse afecta el flujo o entrada de energía al sistema lótico. También dos de los proyectos destacan solo el impacto que se tendría sobre los peces (sin considerar otros componentes del ecosistema). En tanto, los objetivos que se quieren alcanzar con la mantención de un caudal ecológico son diferentes para cada proyecto; aparece nuevamente el interés explícito por los peces, el hábitat para la flora y fauna acuática aunque también la conservación del paisaje (en un caso).

Sin embargo, los métodos seleccionados para cuantificar el caudal ecológico están basados en su mayoría en la estimación del requerimiento de flujo o volumen de agua necesario para la sobrevivencia y desplazamiento de peces. Aunado a lo anterior, de los 7 proyectos, en solo un caso se utilizó el método IFIM, mientras que para los demás proyectos se calcularon caudales bajo métodos hidrológicos simples sin explicitar criterios ecológicos y en general determinando un volumen mínimo de agua invariable (tabla 21). Solo en dos proyectos se proponen caudales variables; pero basados en estadísticas simples que enmascaran cambios del flujo que pueden ser importantes.

Para el primer proyecto “Lago Atravesado”, se justifica la mantención de un caudal mínimo por el hecho de no evidenciarse presencia de fauna íctica en el tramo de río afectado, con lo cual, se puede deducir la importancia que implícitamente se les otorga a las poblaciones de peces en la cuantificación del caudal ecológico y la desconsideración de la importancia de la variabilidad natural del flujo hídrico.

Mientras, el caso del proyecto de Embalse Corrales es uno de los pocos que considera un caudal variable mensual pero sigue desestimando la importancia de los flujos altos y muy bajos, así como los elementos del flujo hídrico que guardan relación con la predecibilidad, tasa de cambio y duración.

Por otra parte, a pesar de los grandes esfuerzos que en costo y tiempo involucró la determinación de un caudal ecológico a través del método IFIM, en el caso del proyecto de Quilleco (se demoraron casi un año en realizar la estimación), otra vez se determina un caudal mínimo no variable en el tiempo y basado en el conocimiento de unas pocas especies de peces, debido a esto su evaluación negativa (igual a (-2)).

En tanto, los proyectos como Embalse Illapel, Proyecto Hidroeléctrico La Higuera, Río Licán y Convento Viejo II tienen en común el empleo de métodos hidrológicos simples. En el primer caso, el Embalse Illapel, la estimación de un caudal ecológico basado en el promedio mensual del flujo de agua histórico esconde los cambios diarios, las duraciones de eventos de inundación, etc, desestimándose la importancia de los elementos duración y predecibilidad. En cuanto a la Central de La Higuera, se estaría frente a otro caso donde no se explicitan los criterios ecológicos para cuantificar un caudal mínimo en base a legislaciones ideadas para asegurar el desplazamiento de peces de acuerdo a características particulares de los ríos en cada país donde fueron formuladas (las cuales pueden diferir significativamente de las presentadas para los esteros impactados por la regulación del flujo hídrico en la VI Región). Por último, en el Estudio del proyecto Convento Viejo II se puede apreciar que para calcular un caudal ecológico se utiliza un método hidrológico como el de Tennant (en base al registro de caudales ya modificados) y se entrega al estero un caudal constante independientemente de los cambios naturales del flujo.

Finalmente se muestra en tablas 22 y 23 la evaluación del proceso de determinación de un caudal ecológico para cada proyecto ingresado al SEIA después de 1997. Se evalúa si antes de calcular un caudal ecológico se distingue el impacto que el proyecto podría tener en el ecosistema y si se conceptualiza el mismo como un caudal que debe variar (Tabla 22). Posteriormente, se evalúan las metodologías empleadas para determinar los caudales ecológicos por cada proyecto (Tabla 23).

Tabla 20. Contexto donde se inserta el concepto de caudal ecológico en el SEIA

Región de Chile	Nombre del Proyecto (fecha ingreso a SEIA)	Impacto	Medida	Objetivo
XI	Central Hidroeléctrica Lago Atravesado (Julio 1998)	Pérdida de calidad del paisaje	Mantener un caudal ecológico (propuesto por DGA como una condición para la ejecución del proyecto)	-Mantener un flujo de agua por la cascada que se afectaría con el proyecto intentando resguardar su valor paisajístico y turístico
IV	Embalse Corrales (Agosto 1998)	Impactos relacionados a la vegetación y flora acuática, fauna íctica y recursos hídricos	Entregar al río Choapa de un caudal ecológico	-No se explicita, pero se entiende que para mitigar impactos relacionados a la vegetación y flora acuática, fauna íctica y recursos hídricos
VIII	Central Hidroeléctrica Quilleco (Octubre 1998)	Impactos sobre los componentes ambientales agua y fauna acuática	Mantener un caudal mínimo de sostenimiento ecológico en los periodos en que el caudal afluente por el río no exceda las extracciones	-Conservar la estructura del paisaje del sistema fluvial del área crítica -Conservar el hábitat para todas las especies presentes en el área -Conservar la biodiversidad del área impactada, tanto de organismos productores, consumidores primarios y superiores -Aumentar la superficie utilizable de la mayor parte de las especies presente en el área -Asegurar la permanencia en el área de las especies de peces incluidas en la categoría "Peligro de extinción" y "Vulnerables" -Asegurar la presencia de la especie de mayor importancia económica del área <i>Oncorhynchus mykiss</i> , especie base de la actividad de pesca deportiva del sector

Tabla 20. Continuación

Región de Chile	Nombre del Proyecto (fecha ingreso a SEIA)	Impacto	Medida	Objetivo
IV	Embalse Illapel (Noviembre 1999)	Pérdida de hábitat	Entrega de un caudal permanente denominado caudal ecológico	-Asegurar el régimen hídrico del río conservando las condiciones de hábitat propias del río aguas abajo del embalse
VI	Proyecto Hidroeléctrico La Higuera (Febrero 2004)	Alteración de hábitat para flora acuática y alteración de hábitat para fauna íctica por disminución de caudales	Mantener caudales superiores a un caudal ecológico	- Disponer de un régimen de caudales capaz de mantener el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial en condiciones similares a las naturales
X	Central Hidroeléctrica Río Licán (Mayo 2004)	Alteración de hábitat para la flora y fauna acuática por disminución de caudales	Aplicación de un caudal mínimo o ecológico y monitoreo de fauna íctica	-Permitir la sobrevivencia de las especies de peces (sobre todo nativas en peligro de conservación) aceptando una reducción de su hábitat disponible -Mantener las condiciones ecológicas del río Licán
VI	Convento Viejo Etapa II (Agosto 2004)	Impactos relacionados con la calidad del agua y biota acuática: - Una disminución en magnitud afecta la distribución de las poblaciones -Los principales efectos del caudal generado por el embalse actúan sobre las comunidades bentónicas, en términos de abundancia, riqueza y distribución	Establecer un caudal mínimo ecológico	-No se especifica, pero se entiende que para mantener biota acuática aguas abajo por el estero Chimbarongo

Fuente: Propia

Tabla 21. Métodos utilizados para determinar un caudal ecológico por proyectos ingresados al SEIA en Chile desde 1998

Año de ingreso al SEIA	Región de Chile	Nombre del Proyecto	Tipo de método	Forma de determinación de un caudal ecológico (Q_e)
1998	XI	Central Hidroeléctrica Lago Atravesado	Hidrológico simple	Q_e según análisis estadísticos simples sobre caudales observados de 1979 a 1997
1998	IV	Embalse Corrales	Hidrológico simple	$Q_{e\text{ mensual}} = 0.2 * Q_{\text{mín. diario mensual}}$
1998	VIII	Central Hidroeléctrica Quilleco	Simulación de hábitat	Q_e según método IFIM
1999	IV	Embalse Illapel	Hidrológico simple	$Q_e = (Q_{90\text{ mensual}} * 0,7)$
2004	VI	Proyecto Hidroeléctrico La Higuera	Hidrológico simple	Q_e = aplicando porcentajes Ley francesa y Norma suiza y AyC
2004	X	Proyecto Hidroeléctrico Río Licán	Hidrológico simple	Q_e = comparación de distintas normas y metodologías hidrológicas simples
2004	VI	Convento Viejo Etapa II	Hidrológico simple (Tennat)	$Q_e = 10\%CAM$

Fuente: Propia

Tabla 22. Evaluación de conceptos de caudal ecológico en SEIA de Chile

Proyecto	El caudal ecológico es definido en términos de distintas magnitudes	E	El caudal ecológico es definido para conservar a un nivel ecosistémico	E	El caudal ecológico es definido para mantener relaciones intersistémicas	E	Evaluación (E) final
Central Hidroeléctrica Lago Atravesado	No	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-3) El caudal ecológico definido como un caudal mínimo para mantener el flujo de agua sobre una cascada no asegura la conservación de los ecosistemas
Embalse Corrales	No, se define como un caudal mínimo	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-3) A pesar de que se propone un caudal variable este es expresado como un mínimo. No asegura la conservación de los ecosistemas
Central Hidroeléctrica Quilleco	No	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-3) El caudal ecológico definido como un caudal mínimo para mantener poblaciones de peces no asegura la conservación de los ecosistemas
Embalse Illapel	No	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-3) El caudal ecológico definido como un caudal mínimo para mantener la calidad de hábitat no asegura la conservación de los ecosistemas
Proyecto Hidroeléctrico La Higuera	Si	(+1)	Si	(+1)	No	(-1)	(+1) El caudal ecológico es definido como un régimen de caudales para mantener el ecosistema
Proyecto hidroeléctrico Río Licán	No	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-3) El caudal ecológico definido como un caudal mínimo para mantener flora y fauna acuática no asegura la conservación de los ecosistemas
Convento Viejo Etapa II	No	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-3) El caudal ecológico definido como un caudal mínimo para mantener algunas poblaciones de organismos no asegura la conservación de los ecosistemas

Fuente: Propia

Tabla 23. Evaluación de métodos para la determinación de un caudal ecológico dentro del SEIA en Chile

Proyecto	Se estima un caudal variable expresado en magnitud, frecuencia, duración, predictibilidad y tasa de cambio	E	Se estima un caudal que permita la conservación de la estructura y funcionalidad de un ecosistema	E	Los pasos metodológicos consideran la relación entre caudal e interacciones intersistémicas	E	Los pasos metodológicos consideran la estimación de un caudal para mantener la calidad de las aguas	E	Evaluación (E) Final
Central Hidroeléctrica Lago Atravesado	No	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-4) Se determinan caudales mínimos que no contribuyen a la conservación de los ecosistemas
Embalse Corrales	No, pero el caudal varía por mes	+0,5	No	(-1)	No	(-1)	Si, indirectamente	(+1)	(-0,5) A pesar de que se determinan caudales variables por mes son caudales mínimos que no contribuyen a la conservación de los ecosistemas
Central Hidroeléctrica Quilleco	No	(-1)	No, para conservar los peces	(-1)	No	(-1)	Si	(+1)	(-2) Se determinan caudales mínimos que no contribuyen a la conservación de los ecosistemas
Embalse Illapel	No, pero el caudal varía por mes	+0,5	No, para conservar hábitat	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-2,5) A pesar de que se determinan caudales variables por mes son caudales mínimos que no contribuyen a la conservación de los ecosistemas
Proyecto Hidroeléctrico La Higuera	No	(-1)	Si, pero no se mantiene un caudal variable	(+1)	No	(-1)	No	(-1)	(-2) A pesar de expresar la voluntad de mantener el ecosistemas, se determina un caudal mínimo que se piensa no contribuye con la conservación del ecosistema
Proyecto hidroeléctrico Río Licán	No	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-4) Se determinan caudales mínimos que no contribuyen a la conservación de los ecosistemas
Convento Viejo Etapa II	No	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	No	(-1)	(-4) Se determinan caudales mínimos que no contribuyen a la conservación de los ecosistemas

Fuente: Propia

6.10. Seguimiento en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

Una manera de corroborar si la aproximación metodológica utilizada para cuantificar un caudal ecológico ha dado los resultados esperados sería comparando los datos de línea base y de monitoreos una vez los proyectos comienzan a funcionar. Lamentablemente de los proyectos que han sido sometidos al SEIA después de la aplicación del reglamento de la ley 19.300 (que dispone las bases del SEIA) pocos de ellos se encuentran funcionando actualmente o han llevado a cabo un seguimiento que permita dilucidar la efectividad de mantener un caudal ecológico. Si bien el proyecto “Embalse Corrales” cuenta con un seguimiento exhaustivo de la calidad de sus aguas y de los componentes biológicos desde su funcionamiento, este embalse aún no se abastece de las aguas del río Choapa, por lo cual no se entrega un caudal ecológico a éste.

En la tabla 24 se señalan los proyectos ingresados al SEIA y el estado de avance de estos proyectos y la existencia o no de monitoreo. Como se observa hasta el momento (con la información existente) no se puede afirmar empíricamente que el caudal ecológico estimado por estos proyectos contribuye o no a la mantención de los ecosistemas lóticos.

Tabla 24. Seguimiento de proyectos sometidos al SEIA que han estimado un caudal ecológico

Proyecto	Fecha de puesta en marcha	Fecha comienzo de monitoreo	VARIABLES MONITOREADAS
Central Hidroeléctrica Lago Atravesado	26/10/2004	Debido a que se estima un caudal ecológico para conservar el paisaje no se monitorean variables ecológicas	No hay registro
Embalse Corrales	En el año 2000 empieza a funcionar pero no en su totalidad. Aún no se extraen aguas del río Choapa	<p>Monitoreo biológico: 1- marzo, septiembre y noviembre 2002 2- septiembre, diciembre 2003 y marzo 2004 3- septiembre y diciembre 2004</p> <p>Monitoreo de calidad de agua: 1- dic 2001 a dic 2002 2- ene 2004 a dic 2004 3- sept 2003- feb 2005</p>	<p>Monitoreo biológico: Fitoplacton léntico Zooplacton léntico Placton lóxico de deriva Bentos lóxico de deriva Invertebrados de sedimento Camarones de ríos Batracios</p> <p>Monitoreo de calidad de agua: Variables en norma Nch 1333 Variables microbiológicas Variables adicionales, como DQO, DBO, etc</p>
Central Hidroeléctrica Quilleco	No se ha puesto en marcha	No hay registros	No hay registros
Embalse Illapel	No se ha puesto en marcha. Trabajos en stand-by	No hay registros	No hay registros
Proyecto Hidroeléctrico La Higuera	No se ha puesto en marcha	No hay registros	No hay registros
Proyecto hidroeléctrico Río Licán	No se ha puesto en marcha	No hay registros	No hay registros
Convento Viejo Etapa II	No se ha puesto en marcha	No hay registros	No hay registros

Fuente: Propia

7. DISCUSIÓN

7.1. Supuestos implícitos en la gestión de las aguas asociados al caudal ecológico

Un aspecto relevante del análisis de todos los trabajos considerados en el estudio es que tienen una serie de supuestos implícitos que son fundamentales para entender los resultados de las acciones de manejo y con los cuales los tomadores de decisión operan cuando aplican el concepto de caudal ecológico:

Las condiciones físicas o componentes abióticos no son parte del sistema en estudio.

La mayoría de las aproximaciones metodológicas para cuantificar un caudal ecológico (cuatro de los cinco tipos estudiados) se centran en entender las relaciones entre caudal, variables físicas y poblaciones de peces. Se considera el flujo de agua como factor externo que controla las poblaciones de organismos y no como parte del sistema.

Un flujo mínimo de agua mantiene el ecosistema

Aún con los avances en los conocimientos y en el entendimiento del rol de la variabilidad hidrológica se puede notar que en la mayoría de los conceptos y métodos (estudiados en esta investigación) se define un caudal ecológico como un flujo mínimo. Si bien al considerar el agua como un recurso escaso pareciera lógico preocuparse por cuál es el valor mínimo de agua que debe mantenerse dentro del cauce, también es importante recordar que deben, al menos, definirse caudales variables mensuales (que incluso pueden ser nulos en un mes), una serie de crecidas (mas o menos frecuentes) y flujos de inundación. No obstante, existe un amplio conocimiento sobre la conveniencia de mantener los flujos de energía y nutrientes de entrada al ecosistema, lo que permite el funcionamiento ecosistémico.

Los peces sirven como únicos indicadores del estado del ecosistema

Se recuerda que la idea de mantener un caudal mínimo surge para permitir la producción de peces comerciales y por ello muchos estudios precursores determinaron

cómo el caudal afectaba estas poblaciones de peces. De esta manera, aún hoy en día, muchos estudios definen como únicos y buenos indicadores del funcionamiento del ecosistema a los peces. Sin embargo, como ya se ha discutido en punto 6.7 podrían ser otros organismos mejores indicadores del sistema.

Un alto grado de biodiversidad es la señal que el ecosistema mantiene su funcionalidad

Este supuesto se puede inferir cuando se observa que en general un caudal ecológico es definido o estimado para mantener la biodiversidad pero con el objetivo final de mantener un ecosistema acuático. Sin embargo, como ya se ha discutido en punto 6.2 y en la revisión bibliográfica, puede aumentar la biodiversidad y en consecuencia cambiar la funcionalidad del sistema, existen especies redundantes y por último, la biodiversidad no es la única característica del ecosistema que debe tomarse en cuenta y que cambia a medida que el ecosistema se desarrolla.

Luego de la revisión de los trabajos o estudios realizados en Chile e identificar estos supuestos, a juicio del autor, no se tiene interiorizado el concepto de ecosistema en la gestión de las aguas. Esta falencia como lo expresan Pickett y Cadenasso (2002) es común en el plano de las comunicaciones o en el diálogo público, donde el concepto de ecosistema es utilizado en un sentido metafórico. Los ecosistemas han sido interpretado como máquinas, organismos e incluso algoritmos. Muchas veces también son pensados como lugares de importancia ya sea por su alta biodiversidad o su valor paisajístico. Entonces, la metafórica interpretación que se le pueda estar dando al concepto de ecosistema influye en el mal uso en Chile de conceptos como el de caudal ecológico, y en general, afecta toda la forma de gestión de las aguas en este país.

7.2. Discusión sobre los resultados

A partir de la evaluación realizada en este estudio, observo que se ha utilizado un concepto de caudal ecológico que proviene de una lógica poblacional, la cual plantea que un factor físico como el agua afecta y controla factores químicos y biológicos que explican finalmente la organización de poblaciones de organismos existentes en lugar

dado. Sin embargo, un concepto ideado con esta lógica se utiliza con el fin de conservar sistemas complejos como los ecosistemas lóticos.

Los cuatro conceptos legales o gubernamentales de caudal ecológico revisados fueron evaluados negativamente ya que lógicamente no permiten la mantención de la estructura y de las funciones ecosistémicas. Sin embargo, cabe destacar que en el Estado de Washington y en la Provincia de Québec no es éste el objetivo final que se persigue con el caudal ecológico.

A partir de estas falencias conceptuales, se diseñaron metodologías que estiman un caudal constante durante todo el año, como aquellas de tipo hidrológico simple, hidráulico y de simulación de hábitat. Con la utilización de estas metodologías se estiman caudales mínimos y solo se contempla el efecto que tienen variables físicas sobre poblaciones de peces, por lo cual, fueron evaluadas negativamente. Sin embargo, las metodologías RVA y de tipo holístico, bajo los criterios de esta investigación, son valoradas positivas básicamente porque toman en cuenta el nuevo paradigma de gestión de los ecosistemas acuáticos que resalta la importancia de emular la variabilidad natural del régimen hidrológico. A pesar de ello, se reitera que la mantención de un caudal variable no permite la conservación del ecosistema si no se toman en cuenta los otros componentes del ecosistema y las relaciones entre ellos, como se ha discutido anteriormente.

En tanto, en nuestro país, tanto en los trabajos encomendados por DGA con en los Estudios de Impacto Ambiental casi todos los conceptos adoptados de caudal ecológico fueron evaluados negativos (excepto el concepto dado para el Proyecto Hidroeléctrico La Higuera). Además en todos estos trabajos y estudios se propone cuantificar el caudal ecológico a través de metodologías hidrológicas simples en base a los requerimientos de flujo para peces, por lo cual todas las metodologías o procedimientos utilizados en Chile, sin excepción, fueron evaluadas negativamente. Esta tendencia a utilizar metodologías hidrológicas simples para estimar un caudal ecológico no escapa de la realidad que observaron Arthington et al. (1998), quienes revisaron las técnicas que han sido utilizadas para calcular un “instream flow” en

cincuenta países. Este trabajo revela que las metodologías de tipo hidrológicas son las más comunes a nivel mundial. Dentro de las mismas, el método de Tennat es el más frecuente, ya que en al menos 25 países se ha aplicado este método desde su versión original o modificada según particularidades locales. Mientras, la utilización de una curva de permanencia ha servido para calcular caudales ecológicos en al menos 18 países.

Por otra parte, la DGA reconoce que no se han considerado criterios ecológicos para determinar un caudal ecológico, aludiendo a las falencias del sistema de gestión de las aguas y a la falta de conocimiento de los ecosistemas (lo cual es confirmado por el estudio realizado por la Universidad de Chile (2000) relacionado con el tema). Tampoco dentro del Sistema de Evaluación de Impactos, ningún proponente cuantifica el caudal ecológico generando un modelo simplificado de la estructura y funcionamiento del ecosistema que se alterará y que es lo que se pretende mantener y cuál es el impacto de la regulación del flujo hídrico y del flujo de entrada de energía en ese modelo de sistema. Por el contrario, definen el caudal ecológico como una medida para mitigar la disminución de caudales y en general para salvaguardar especies de peces objetivos. Esta situación no sorprende cuando se observa que la misma DGA en su manual de procedimiento establece que un caudal ecológico puede ser cuantificado a través de métodos que contienen criterios puramente hidrológicos. Sin embargo, en estos últimos años se han concentrado esfuerzos para evaluar la posibilidad de utilizar el método IFIM. Es así como los proponentes de la central hidroeléctrica Quilleco utilizan este método y en el año 2000 se realiza un estudio piloto para determinar la aplicabilidad en Chile de un sistema físico de simulación de hábitat (PHABSIM) (Universidad de Chile, 2000 y Davis y Riestra, 2002). Lamentablemente, como ya se ha discutido con anterioridad, este tipo de método no es idóneo para lograr la conservación de ecosistemas lóticos.

7.3. Análisis de la hipótesis

Cuando se evalúan los conceptos de caudal ecológico de los cuatro países estudiados, se observa que se mantiene la concepción original de que un flujo mínimo

de agua es necesario para la sobrevivencia de algunas poblaciones. Y cuando se utiliza para este fin, como lo plantean en el Estado de Washington y en la Provincia de Québec se piensa que la mantención del caudal ecológico puede a corto o mediando plazo ser eficaz (serviría para mantener poblaciones de peces específicas o la “vida silvestre”). Es así como el organismo “*US Fish and Wildlife Service*” continua recomendando y desarrollando la metodología IFIM para estimar caudales que contribuyan a mantener poblaciones de peces de alto valor para la pesca.

Sin embargo, en documentos gubernamentales de Chile y Brasil se expresa la intención de conservar la biodiversidad, ecosistemas y/o paisajes. Específicamente, en Chile tanto en trabajos encargados por la DGA como en algunos Estudios de Impacto Ambiental el objetivo planteado ha sido la conservación de los ecosistemas proponiendo la mantención un flujo mínimo, sin internalizar la importancia de las relaciones intersistémicas y asumiendo al flujo de agua como una variable o factor externo y no como un componente del sistema, desestimando las relaciones complejas y de retroalimentación que se suscitan entre los componentes de los ecosistemas lóticos. **Por lo tanto, los resultados indican que en Chile al aplicarse el concepto de caudal ecológico se presentan limitaciones para alcanzar teóricamente la conservación a un nivel ecosistémico** (ya que no se consideran los criterios teóricos mínimos para conservar a ese nivel).

A pesar de ello, no se cuenta con evidencia empírica adecuada para saber si la aplicación del caudal ecológico hasta ahora ha sido o no exitosa para conservar ecosistemas, ya que no se tienen datos sobre la estructura del ecosistema antes y después de entrar en funcionamiento un embalse y de haber mantenido un caudal ecológico.

En términos lógicos, tal como se indica en la hipótesis, es menos probable que tuviera éxito la aplicación del concepto de caudal ecológico, porque el mismo se ha diseñado con el objeto de conservar poblaciones de peces, no ecosistemas lóticos.

7.4. Problemas de gestión de las aguas y sus consecuencias en los ecosistemas lóticos.

Aunado a lo anterior, en Chile se administran los ríos por secciones lo cual hace muy difícil conservar con un enfoque ecosistémico y por otra parte, existe una gestión sectorizada de las aguas con respecto a otros componentes de los ecosistemas acuáticos; por ejemplo, se encuentra desconectada con la gestión del uso de suelo. Por otra parte, la modificación del flujo hídrico no se relaciona con los impactos producidos por los cambios en las características geomorfológicas del cauce originados por canalizaciones, el aprovechamiento de napas subterráneas y la deforestación, por lo cual, no se lograría la conservación de los ecosistemas a pesar de mantener un caudal ecológico.

En resumen la gestión de las aguas en Chile presenta a juicio del autor algunas características que dificultan la aplicación del concepto de caudal ecológico, entre ellas:

- ✓ Se presenta una ausencia de una gestión integrada de los recursos hídricos que considere las interacciones de las aguas superficiales y subterráneas (las cuales tampoco se conocen bien), los aspectos de cantidad y calidad, así como la gestión coordinada del territorio, la vegetación y los recursos hídricos.
- ✓ El marco legal en que se inserta este concepto es débil para su implementación efectiva.
- ✓ No se han definido parámetros u objetivos específicos y cuantificables de conservación cuando se estima un caudal ecológico.
- ✓ La vigilancia es limitada, lo cual también se dificulta si no está acompañada de indicadores de éxito u objetivos cuantificables. Si no se definen los objetivos de conservación e incluso siguen existiendo conceptos de caudales ecológicos diferentes entre los organismos difícilmente se podrá controlar en qué grado se están cumpliendo las metas.

Por otra parte, esta gestión no cuenta con el apoyo del conocimiento de los ecosistemas y de sus estados más naturales (dado a que muchos se encuentran

intervenidos) y los aspectos legales de otorga de derechos de agua dificultan la planificación y la gestión de las aguas de manera tal que se conserven los ecosistemas lóticos.

7.5. Propuesta de gestión relacionadas al concepto de caudal ecológico

Cuando se modifica el flujo hídrico y el flujo de entrada de energía a los ecosistemas lóticos debido al funcionamiento embalses resulta inevitable que se altere la estructura y funcionalidad de los mismos. Si se reduce el flujo de agua, la estructura de estos sistemas cambia y pasan a constituir ecosistemas diferentes. Por lo tanto, cuando se construyen embalses no parece factible preservar o mantener en el mismo estado de desarrollo el ecosistema afectado por el embalse. Lo que debe tenerse claro en la gestión ambiental de las aguas es: cuáles son los impactos de la alteración del régimen hídrico y hasta qué grado se está dispuesto a exponer los ríos en pro de un crecimiento económico. Luego de establecer objetivos claros o mensurables de conservación se puede comenzar a discutir sobre la manera para alcanzarlos.

En primera instancia, se debe avanzar en el entendimiento que el caudal, si bien es importante y afecta una serie de variables, es un componente del ecosistema. No basta con mantener un caudal de agua aunque variable para conservar los ecosistemas si no se toma en consideración la importancia de la naturaleza de los sustratos o sedimentos en el cauce y otras características geomorfológicas, la composición y densidad de especies vegetales, etc.

Lo que se propone, es comprender que la columna de agua es un componente constitutivo del ecosistema, que interactúa con componentes bióticos acuáticos y otros componentes como los sedimentos y la vegetación ripariana (figura 8).

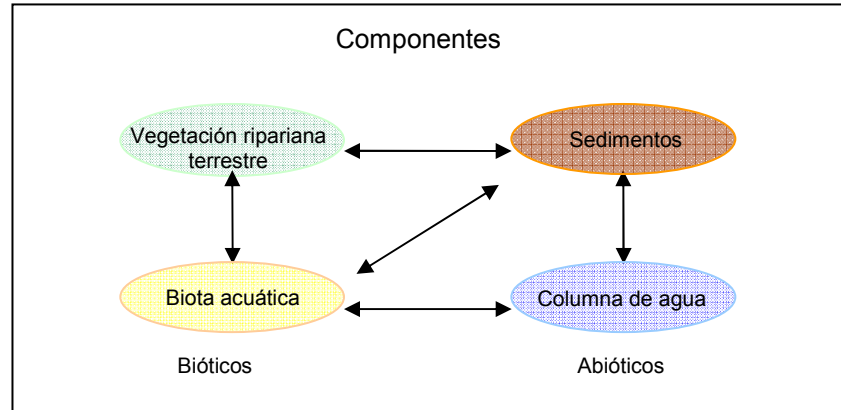


Figura 8. Componentes de un ecosistema lótico

Fuente: Propia

Entre los componentes de este esquema hay flujos de materia y energía que los transforman. Por ejemplo, la vegetación ripariana modifica las condiciones químicas del agua y la entrada de vegetación alóctona al cauce aumenta su concentración en materia orgánica. La materia orgánica proveniente de esta vegetación ripariana cambia la naturaleza de los sedimentos o pasa a ser parte de un sustrato para algunos invertebrados (componentes bióticos). Por otra parte, el sedimento resulta un componente también clave que se ve afectado por el flujo de agua, como a su vez afecta la columna de agua, la velocidad de la misma, sus condiciones químicas, etc. Los organismos acuáticos, en tanto, afectan la calidad del agua, consumen oxígeno y/o liberan dióxido de carbono, los microorganismos dejan disponible materia orgánica al descomponer material particulado grueso, etc. De esta manera, múltiples relaciones están dadas entre estos componentes.

Al entender estas relaciones, en especial, en caso de proyectos de embalses se advierte que adoptar una medida como caudal ecológico de forma aislada no resuelve los problemas como el corte del flujo de material particulado a través del continuo del río, tampoco resuelve los problemas de anoxia, de cambios de temperatura y el secuestro de nutrientes por el hecho de embalsar las aguas.

A pesar de esto, se debe considerar al caudal ecológico como una medida de gestión mínima y para que contribuya en la mantención de un ecosistema aunque diferente pero derivado del existente previamente, **el caudal ecológico debe estar definido como un flujo hídrico variable y un flujo de energía entrante al cauce para contribuir a mantener una determinada estructura y función de un ecosistema lótico.**

Este caudal ecológico debe estar expresado en magnitud, frecuencia, duración, predecibilidad y tasa de cambio. Siguiendo este raciocino, diversos estudios analizados y sintetizados por Postel y Richter (2003) estipulan que al menos es necesario mantener lo siguiente:

- a) La condición de perenne o no del río.
- b) Un caudal mínimo en meses más secos y que asegure una cierta calidad de las aguas.
- c) Mayor cantidad de agua dentro del cauce en los meses más lluviosos y menos agua en meses más secos.
- d) El patrón estacional de mayores flujos de base para estaciones húmedas.
- e) Flujos de inundación durante los periodos más húmedos.
- f) La duración de los flujos de inundación (aunque estos pueden ser acortados con ciertos límites y de forma controlada). También se resalta que es mejor mantener ciertos flujos de inundación a toda su magnitud y eliminar algunos antes de preservar todos los máximos de flujo a niveles bajos.
- g) El primer o uno de los primeros flujos de inundación en toda su magnitud.

En la tabla 25, se presenta la información que se requiere para determinar y mantener un caudal variable. Esta información debe idealmente dar cuenta del régimen hídrico "natural" durante un ciclo, es decir durante un periodo que pueda observarse un patrón de repetición de comportamiento. Respecto a lo mismo, Richter et al. (1997) indican que es necesario estudiar al menos 20 años atrás del momento cuando se desea modificar el régimen. A partir de estos datos sobre el comportamiento del régimen hídrico lo que se sugiere **es estimar caudales ecológicos, si bien de magnitudes menores a los observados antes de la intervención antrópica, que**

emulen dicho comportamiento hidrológico “natural” (como se representa en la figura 9)

Tabla 25 Información hidrológica requerida para estimar un caudal ecológico

Información que se requiere	Finalidad de la información requerida
Flujos de base para estaciones secas y húmedas	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar la condición de perenne o no del río • Determinar un caudal mínimo en meses más secos y que asegure una cierta calidad de las aguas • Mantener mayor cantidad de agua dentro del cauce en los meses más lluviosos y menos agua en meses más secos.
Flujos altos “normales”	<ul style="list-style-type: none"> • Mantener el patrón estacional de mayores flujos de base para estaciones húmedas
Tasas de cambio de aumento y disminución de crecidas Duración y magnitud de flujos de inundación	<ul style="list-style-type: none"> • Mantener flujos de inundación durante los periodos más húmedos • Mantener la duración de algunos flujos de inundación • Conservar el primer o uno de los primeros flujos de inundación en toda su magnitud
Condiciones extremas de sequía y de inundación que no ocurren todos los años Variabilidad interanual en cada uno de estos elementos	<ul style="list-style-type: none"> • Estimar caudales ecológicos considerando variabilidad interanual

Fuente: Propia

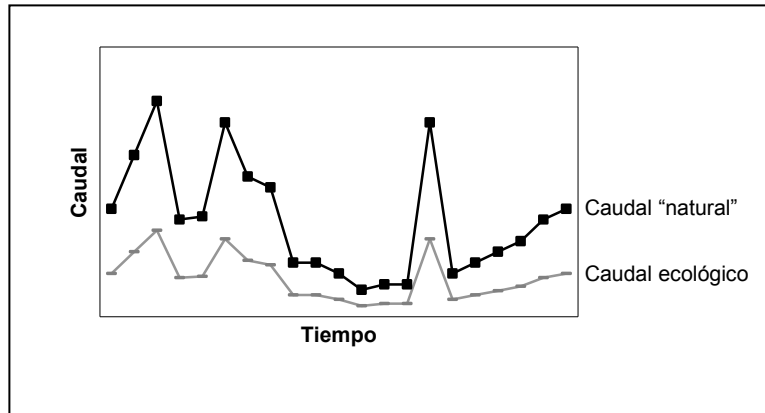


Figura 9. Representación del comportamiento del caudal “natural” y del caudal ecológico propuesto

Fuente: Propia

Además de estas consideraciones, si tomamos en cuenta el modelo presentado en la figura 2 donde se muestra el ecosistema como un sistema termodinámicamente abierto en el que se destaca el ambiente de entrada y salida como parte integral del ecosistema, y también se resalta la importancia de la entrada de energía al sistema por el aporte de la materia orgánica (que en el caso de un ecosistema lótico proviene en su mayoría de la vegetación ripariana), así como el rol de los nutrientes, se puede deducir que no solo es importante mantener un cierto flujo de agua que contribuya con el desarrollo del sistema si no también es necesario mantener el flujo de entrada de energía al sistema.

De esta manera, en todos los niveles de toma de decisión es necesario generar cambios en relación al concepto y a la aplicación de un caudal ecológico. Se resalta que la base para avanzar en las modificaciones parte desde la política (lo que se trata de simbolizar en la figura 10) y desde el concepto de caudal ecológico. Sólo después de un cambio en esta base se deben concretizar las intenciones u objetivos de las políticas con leyes que las respalden, así como con planes y programas destinados, en primera instancia, a una planificación territorial por cuencas y a la búsqueda de información ecológica y monitoreo a largo plazo. En tanto, a los proyectos que ingresan

al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental se les puede exigir tomar ciertas medidas de mitigación o compensación en función de un conocimiento de los ecosistemas que debe ser apoyado por los planes de gobierno.

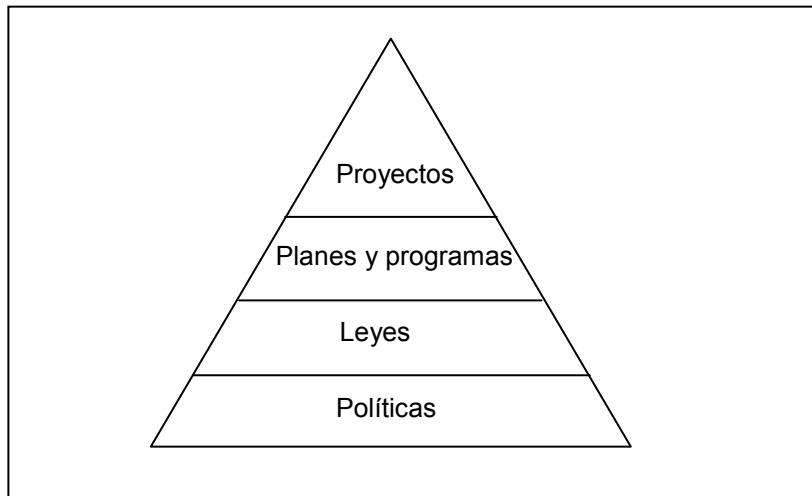


Figura 10. Niveles de toma de decisión

Fuente: Propia

En específico, a juicio del autor, un cambio de base primordial comprende también una modificación en el sistema de gestión de las aguas en Chile, apuntando a una integración de la gestión con otros componentes y estipulando en la ley el no uso del agua o diversos “usos ambientales”. Positivamente, así como recientes modificaciones del Código de Aguas (Oficio N° 5524, 2005) otorgan facultad a los gestores de priorizar los usos, nuevos cambios dirigidos a la duración finita de la concesión de los derechos de agua y al cobro por su uso u otros mecanismos para la racionalización en el consumo de este recurso podrían resultar beneficiosos para lograr ciertas metas ambientales en conjunto con la mantención de un caudal ecológico.

En cuanto, a la planificación por cuencas que se sugiere, se piensa que es primordial determinar con los usuarios de la cuenca, los usos del suelo y del agua en el territorio para luego calcular un caudal de agua y de energía correspondiente a satisfacer tales demandas.

Finalmente, tomando la idea de Einstein, es importante destacar que no podemos resolver los problemas generados por el manejo de las aguas bajo la misma manera de pensar con la cual los hemos creado (*"You cannot solve a problem within the same mind-set that created it"* - Albert Einstein). Un nuevo paradigma debe incorporarse en la gestión de las aguas en Chile para conservar los ecosistemas lóticos. Un primer paso debe estar dirigido a entender el concepto de ecosistema y lo que significa conservar a un nivel ecosistémico. Otro avance debe guardar relación con la importancia de emular las características del flujo hídrico y con la relevancia para el funcionamiento de los ecosistemas lóticos del ingreso de energía al sistema a través de materia orgánica aportada por la vegetación ripariana. Además de recalcar la importancia de la columna de agua como componente constitutivo de los ecosistemas lóticos, es necesario que grupos multidisciplinarios participen en el manejo ambiental de las aguas y las decisiones no se guíen por criterios meramente hidrológicos.

Por último, no debe olvidarse que también la comunidad juega un rol importante en la gestión, así como el comportamiento individual y las elecciones personales pueden representar el cambio de rumbo de un sistema que conlleva a un consumo desmedido de un recurso natural indispensable como el agua y que ha su vez a sido calificado por su escasez como **un recurso no renovable**.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ALLAN J. D. 1995. Stream Ecology: Structure and functioning of running water. Londres, Chapman & Hall. 338 p.
- ALVES, M y BERNARDO, J. 2000. Contribuição para uma metodologia de determinação do caudal ecológico em cursos de água temporários. En: 5º Congresso da Água. Lisboa. pp. s.p.
- ANA. Brasil, 2004. Gestão das águas [en línea] <<http://www.ana.gov.br>> [consulta: 15 septiembre 2004]
- ARTHINGTON, A ; PUSEY, B; BRIZGA, S; MCCOSKER, R; BUNN, S; GROWNS, I. 1998. Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment techniques: R & D Requirements. LWRRDC Occasional paper 24/98. ISBN 06426743 X.
- AYALA y CABRERA Ingenieros Consultores Ltda. 1996. Caudales Ecológicos Caracterización Hidroambiental Etapa I. Informe Final. Encomendado por: Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. Dirección General de Aguas. 235 p.
- BEATTIE CRUZ A. 2002. Efecto de la regulación del régimen hídrico sobre la estructura de los ecosistemas lóticos. Memoria de grado para optar al título de Licenciatura en Química Ambiental. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias. 76 p.
- BAYLEY, P. 1995. Understanding large river floodplain ecosystems. Bioscience 45 (3):153-159.
- BELZILE, L; BÉRUBURÉ, P; HOANG, V. D y LECLERC, M. 1997. Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec. En: Reporte presentado por INRS-Eau y Groupe-conseil Génivar inc. al Ministère de l'Environnement et de la Faune. Québec- Canada. 83 p.
- BENETTI A ; LANNA, E ; COBALCHINI, M. 2003. Metodologías para determinação de vazoes ecológicas em rios. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 8(2): 149-160.
- BIGGS, B; NIKORA, V. I; SNELDER, T. H. 2005. Linking scales of flow variability to lotic ecosystem structure and function. River Research and Applications 21: 2834-298.
- BRAGG, O; BLACK, A; DUCK, R. 1999. Anthropogenic impacts on the hydrology of rivers and lochs. En: Scotland & Northern Ireland Forum for Environmental Research. Report N° W98 (50) I1. Stirling, University of Dundee. pp. s.p.
- BRIZGA, S; ARTHINGTON, A; PUSEY, B; KENNARD, M; WERREN, G; CRAIGE, N y CHOY, S. 2002. Benchmarking a Top –Down Methodology for Assesing Environmental Flows in Australian Rivers. Environmental Flows in River Systems. En: 4th International Ecohydraulics Symposium Conference Proceeeding. Cape Town. pp. s.p.

- BUNN, S.E; DAVIES, P.M; MOSISCH, T.D. 1999. Ecosystem measures of river health and their response to riparian and catchment degradation. *Freshwater Biology* 41: 333-345.
- CENTRO EULA-CHILE. 1999. Estudio para la determinación de un caudal mínimo ecológico para Central Hidroeléctrica Quilleco. pp. s.p.
- Código RCW 90.22. ESTADOS UNIDOS. Legislación del Estado de Washington, Washington, Estados Unidos, 1998 [en línea] <<http://www.leg.wa.gov/RCW>> [consulta: enero 2005]
- Código RCW 90/54.020. ESTADOS UNIDOS. Legislación del Estado de Washington, Washington, Estados Unidos, 1971 [en línea] <<http://www.leg.wa.gov/RCW>> [consulta: enero 2005]
- CONAMA, CHILE. 1999. Addendum II de Proyecto: Embalse Illapel, 1999. [en línea] < http://www.e-seia.cl/seia-web/ficha/fichaPrincipal.php?id_expediente=2436> [consulta: junio 2004].
- CONAMA, CHILE. 2004. Addendum III para Proyecto: Central Hidroeléctrica la Higuera, 2004. [en línea] < http://www.e-seia.cl/seia-web/ficha/fichaProceso.php?id_expediente=6289&idExpediente=6289> [consulta: marzo 2004]
- CONAMA. Chile, 1998. Documento de Discusión: Gestión Integrada del Recurso Agua [en línea] <www.conama.cl/cds/cat_10acta> [consulta: 06 de junio 2004]
- CONTRERAS, M. L. 1998. Flujo de Carbono en el Ecosistema Río Clarillo. Autotrofia Versus Heterotrofia. Tesis de doctorado. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias. 147 p.
- CUMMINS K.W, PETERSEN, R.C; HOWARD, F.D; WUYCHECK, J.D; HOLT, V.C. 1973. The utilization of leaf litter by stream detritivores. *Ecology*. 54: 336-345.
- DAVIS M. D y RIESTRA F. 2002. Instream flow Policies and Procedures within Integrated Water Management in Chile. En: 4th International Ecohydraulics Symposium Conference Proceedings. Cape Town. pp. s.p.
- DGA, COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO, CEPAL y GLOBAL WATER PARTENERSHIP. Chile, 2003. Taller Nacional – Chile: Hacia Un Plan Nacional de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. 272 p.
- DGA. Chile, 1999. Política Nacional de Recursos hídricos [en línea] <www.dga.cl> [consulta: 24 de abril 2004]
- DGA. Chile, 2002. Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos [en línea] <www.dga.cl/secuencias/servicios/derech_Criterios.htm> [consulta: 24 de abril 2004]
- FAUNE ET PARCS QUEBEC. 1999. Politique de débits réservés écologiques pour la protection du poisson et de ses habitats. Direction de la faune et des habitats. 23 p.
- GARCÍA DE JALÓN y GONZÁLES DEL TÁNAGO, 2002 [en línea] <www.us.es/ciberico/archivos_acrobat/zaracomun3garciajalon.pdf> [consulta: 23 de enero 2004]
- GESAM consultores Ltda. 2004. “Proyecto Hidroeléctrico Licán” Estudio de Impacto Ambiental: Estimación de Caudal Ecológico. 35p.

- HAKENKAMP C.C y MORIN A. 2000. The importance of meiofauna to lotic ecosystem functioning. *Freshwater Biology* 44: 165-175.
- HUDSON, H; BYROM, A; CHADDERTON, L. 2003. A critique of IFIM-instream habitat simulation in the New Zeland context. *Science for Conservation* 231:1-69.
- JOSHI, H. A; LAWLER S.P; SPEHN, E. M y WILBY, A. 2001. Conservation implications of the link between biodiversity and ecosystem functioning. *Oecologia* 129: 624-628.
- KING, J y LOUW, D. 1998. Instream Flow Assessment for regulated rivers in South Africa using Building Block Methodology. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 1 (2): 109-124.
- KING, J; Tharme, R; Brown,C. 1999. Definition and Implantation of Instream Flows. En: Reporte final para World Comission of Dam. University of Cape Town. pp. s.p.
- LAMB, L.B. 1995. Criteria for evaluating State Instream-Flow programs: deciding what works. *Journal of Water Resources Planning and Management* 121 (3): 270-274.
- Ley « La loi du 29 juin 1984 ». FRANCIA. Ley para preservar los medios acuáticos y proteger el patrimonio piscícola (Loi: préserver les milieux aquatiques et protéger le patrimoine piscicole), Gobierno de Francia, Francia, París, junio 1984 [en línea]<http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/dossier_presse_40eme_anniversaire_loi_1964.pdf> [consulta: 7 febrero 2005]
- Ley 19.300. CHILE. Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente. CONAMA, Santiago, Chile, marzo 1994. 182 p.
- Ley 814.20. SUIZA. Ley Federal sobre la protección de las aguas. L'Assemblée fédérale de la Confédération suisse. Ginebra, Suiza, enero 1991 [en línea] <http://www.admin.ch/ch/f/rs/814_20/a36.html> [consultado: 7 febrero 2005]
- Ley 4.771. BRASIL. Código Forestal. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Brasilia, Brasil, septiembre1965.
- ODUM, E.P. 1969. The Strategy of Ecosystem Development. *Science* 164: 262-270.
- ODUM E. P y SARMIENTOS F.O. 1998. Ecología: Puente entre ciencia y sociedad. Méjico. Mc.Graw-Hill eds. 343 p.
- Oficio n° 5524. CHILE. Modificaciones del Código de Aguas. [en línea] <http://www.dga.cl/secuencias/%FAltimo_ORD_Congreso_Modif_CA.pdf> [consulta: junio 2005].
- PELISSARI, V y SARMENTO, R. 2003.Vazão ecológica para o Ríó Santa María da Vitória, ES. En: 5° Seminario Estadual sobre Saneamento e Meio Ambiente, Vitória-ES. pp. s.p
- PICKETT, S.T.A y CADENASSO, M. L. 2002. The Ecosystem as a Multidimensional Concept: Meaning, Model, and Metaphor. *Ecosystem* (5). 1-10.
- POFF, N. L, ALLAN J. D. 1997. The Natural Flow Regime. *Bioscience* 47 (11): 769-785.
- POFF, N.L; HARTS, D.D. 2002. How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal. *Bioscience* 52 (8): 659-668.

- POFF, N.L; PALMER, M.A.1997.Heterogeneity in Streams: the influence of environmental heterogeneity on patterns and proceses in streams. J.N. Amer. Benthol. Soc. 16:168-173.
- POFF, N.L; WARD, J.V. 1989.Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science. 46: 1805-1818.
- POSTEL, S y RICHTER, B. 2003. Rivers for life: Managing water for people and nature. Washington, Washigton: Island Press. 253 p.
- PUCKRIDGE, J.T.,Sheldon, F., Walker, K.F. y Boulton, A. J. 1998. Flow variability and the ecology of large rivers. Marine and Freshwater Research 49: 55-72.
- RCA N° 109. CHILE. Resolución de Calificación para Proyecto: Embalse Corrales. CONAMA, La Serena, Chile, octubre de 1999. 79 p.
- RCA N° 137. CHILE. Resolución de Calificación para Proyecto: Embalse Illapel. CONAMA, La Serena, Chile, 1999. 30 p.
- RCA N° 017. CHILE. Resolución de Calificación para Proyecto: Central Hidroeléctrica Lago Atravesado. CONAMA, Cohaique, Chile, agosto 2000. 58 p.
- RCA N° 023. CHILE. Resolución de Calificación para Proyecto: Central Hidroeléctrica Quilleco. CONAMA., Concepción, Chile, diciembre 2000.
- RCA N° 116. CHILE. Resolución de Calificación para Proyecto: Central Hidroeléctrica la Higuera, CONAMA, Rancagua, Chile, agosto 2004. 86p.
- RCA N° 067. CHILE. Resolución de Calificación para Proyecto: Convento Viejo Etapa II. CONAMA, Rancagua,Chile, junio 2004. 113p.
- RCA N° 862. CHILE.. Resolución de Calificación para Proyecto: Central Hidroeléctrica Río Licán. CONAMA, Pto. Montt, Chile, diciembre 2004. 24 p.
- Resolução n°16. BRASIL. Criterios generales para la otorga del derecho del uso de recursos hídricos. Consejo Nacional del Recurso Hídrico, Brasilia, Brasil, mayo de 2001. [en línea] <www.cnrh-srh.gov.br> [consulta: junio 2004].
- REISER, D. W; WESCHE, T. A; ESTES, C. 1989. Status of instream flow legislation and practices in North America. Fisheries. 14(2):22-29.
- R&Q INGENIERÍA. 1993. Caudales ecológicos en regiones IV, V y Metropolitana. Encomendado por: Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. Dirección General de Aguas. 177 p.
- RICHTER, B; BAUMGARTENER, J; POWELL, J; BRAUN, D. 1996. A Method for assessing Hidrologic Alteration within Ecosystem. Conservation Biology 10 (14):1163-1174.
- RICHTER, B; WIGINGTON, R; BAUMGARTENER, J; BRAUN, D. 1997. How much water does a river need? Freshwater Biology 37 (1): 231- 249.
- SILVEIRA, L.A y SILVEIRA, L.G. 2001. Vazões mínimas. En: Hidrología Aplicada: a gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre, Editorial ABRH, pp.135-176.
- STALNAKER, C; LAMB, B; HENRIKSEN, J; BOVEE, K; BARTLOW, J. 1995. The Instream Flow Incremental Methodology: A Primer for IFIM. En: Washington, DC: U.S. Geological Survey Biological Report 29. 45 p.
- STANLEY, V.G; SWANSON, F.J ; McKEE, W.A ; CUMMINS, K.W. 1991. An ecosystem perspective of riparian zones. Bioscience 41(8): 540-551.

- THARME, R.E. 2002. A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of Environmental flow methodologies for rivers En: 4th International Ecohydraulics Symposium Conference Proceeding, Cape Town. pp. s.p.
- UNIVERSIDAD DE CHILE. 1999. Informe País: Estado del medio ambiente en Chile [en línea] <[http://www.uchile.cl/capp/informepais/Recursos%20Hidricos .pdf](http://www.uchile.cl/capp/informepais/Recursos%20Hidricos.pdf)> [consulta: 6 de enero 2004]
- UNIVERSIDAD DE CHILE. 2000. Análisis de Criterios Hidroambientales en el Manejo de Recursos Hídricos: Monitoreo de una cuenca piloto para la determinación de caudales ecológicos. Encomendado por: Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. Dirección General de Aguas. 8 capítulos (8-6).
- UNIVERSIDAD DE CHILE^a. 1998. Análisis de Criterios Hidroambientales en el Manejo de Recursos Hídricos: Pautas para la determinación de caudales ecológicos. Encomendado por: Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. Dirección General de Aguas. 130 p.
- UNIVERSIDAD DE CHILE^b. 1998. Análisis de Criterios Hidroambientales en el Manejo de Recursos Hídricos: Diseño de Plan de Monitoreo para la determinación de caudales ecológicos. Encomendado por: Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. Dirección General de Aguas. 56 p.
- VALETT, H.M; DAHM, C.N.; CAMPANA, M.E; MORRICE, J.A; BAKER, M.A; FELLOWS, C.S.1997. Hydrologic influences on groundwater-surface water ecotones: heterogeneity in nutrient composition and retention. Journal of the North American Benthological Society 16:239-247.
- WARD V.J, BRETSCSKO G, BRUNKE M., DANIELOPOL D., GIBERT J., GONSER T. y HILDREN A.G. 1998. The boundaries of river systems: the metazoan perspective. Freshwater Biology 40: 531-569.
- WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF ECOLOGY. 2001. Setting Instream Flows in Washington state. [en línea] <<http://www.ecy.wa.gov/pubs/981813wr.pdf> > [consulta: 6 de enero 2004]
- WASHINGTON DEPARTMENT OF FISH AND WILDLIFE. 2003. A guide to instream flow setting in Washigton State. [en línea] <<http://wdfw.wa.gov/>>[consulta: 6 agosto 2004]

9. ANEXO 1

A.1 Métodos hidrológicos

Los métodos hidrológicos se basan en el análisis estadístico de los regímenes de caudales históricos (de décadas o más tiempo). La complejidad con que se analizan estos datos dan como resultado estimaciones de caudales fijos (expresados como caudales mínimos) o de caudales variables (King et al., 1999 y Benetti et al., 2003).

Entre los métodos hidrológicos más utilizados se encuentran:

A.1.1 Método de Curva de Permanencia

Este método consiste en la construcción de una curva a partir de datos de caudales diarios, mensuales o anuales donde se presenta la relación entre ciertos rangos de caudales y el porcentaje de tiempo en que cada uno de esos rangos es igualado o excedido (figura A 1). El caudal ecológico es expresado como un valor fijo que corresponde a un rango de caudal que se mantiene igualado o excedido un cierto porcentaje de tiempo (Silveira y Silveira, 2003). Generalmente, se recurre al juicio de expertos para estimar ese porcentaje máximo de tiempo y determinar ciertamente un caudal mínimo. Específicamente en Estados Unidos, se han calculado caudales que mantienen niveles mínimos de agua para asegurar la sobrevivencia de poblaciones de peces o invertebrados (King, et al., 1999).

En Brasil, este es uno de los métodos mas utilizados para estimar caudales ecológicos. Por ejemplo, en el Estado Pernambuco se calculó indirectamente un caudal ecológico como el 5% de Q_{90} (Benetti et al., 2003). Por otra parte, en la Provincia de Québec un supuesto base para la estimación de un caudal ecológico es que un porcentaje de tiempo superior a 90 generaría un caudal muy bajo mientras que un porcentaje menor a 50 correspondería a un volumen de agua inútilmente elevado (Belzile et al., 1997).

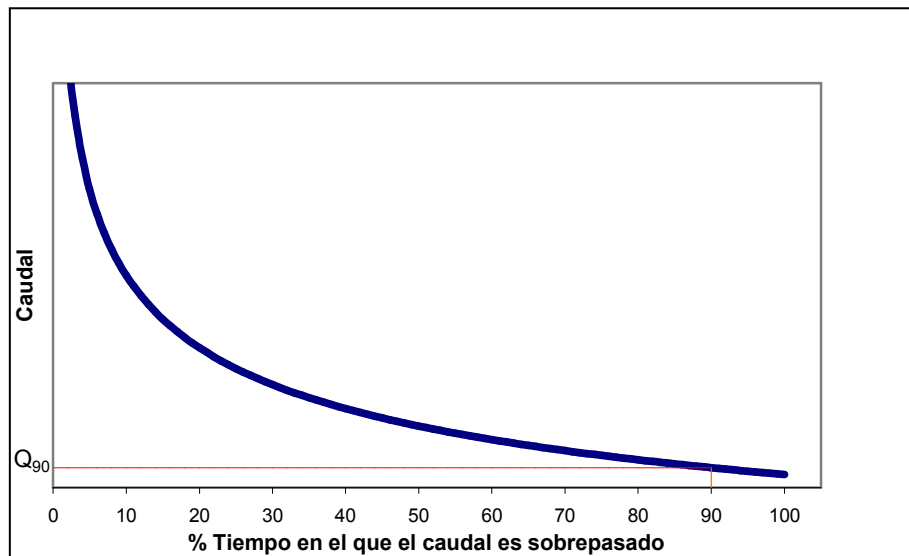


Figura A I. Curva de Permanencia.

Fuente: Propia. Nota: Q_{90} correspondería al caudal que fue sobrepasado el 90 por ciento del tiempo de observación

A.1.2 Método de Tennant o Montana

Este método se basa en un estudio realizado por la US Fish and Wildlife Service en once arroyos ubicados entre los Estados de Montana, Nebraska y Wyoming. El objetivo del mismo era encontrar una relación entre el caudal y la disponibilidad de hábitat para la biota acuática (Tennant, 1976 citado en Bragg et.al, 1999). Tennant dividió el año en un periodo seco y otro lluvioso, para los cuales propuso caudales expresados como porcentajes del caudal medio anual (CAM) relacionándolos con grados de conservación (Tabla A I). Según sus observaciones, el hábitat comenzaba a degradarse cuando el flujo era inferior al 10 por ciento del CAM, mientras que el 60 por ciento se consideró como un flujo suficiente para mantener el hábitat en estado óptimo. Estos resultados estuvieron asociados a una velocidad media de 0,25 m/s y a una profundidad media de 0,3 m, así como también a las condiciones hidrológicas y geográficas del norte y centro de Estados Unidos.

Tabla A I. Estados de conservación de los ríos de acuerdo a Caudal Anual Mensual

Estado de conservación	% CAM de Octubre a Marzo	% CAM de Abril a Septiembre
Máximo(flushing or maximum)	200%	200%
Rango óptimo (optimum range)	60-100%	60-100%
Sobresaliente (outstanding)	40%	60%
Excelente (excellent)	30%	50%
Bueno (good)	20%	40%
Regular o en degradación (fair or degrading)	10%	30%
Pobre o mínimo (poor or minimum)	10%	10%
Degradación severa (severe degradation)	< 10%	< 10%

Fuente: Tennant, 1976. Entre paréntesis se encuentran los términos originales en inglés

Este método es uno de los más frecuente y antiguamente utilizados en Estados Unidos desde los años setenta (Postel y Richter, 2003) y aún en las provincias marítimas de Canadá se estima que 0,25 del caudal medio anual es el volumen mínimo requerido para asegurar la vida acuática (independiente de la estación o de la especie) (Cassie y El Jabi, 1995 citado en Belzile et al., 1997). También a partir de modificaciones simples del Método de Tennant en Estados Unidos son desarrollados y aplicados otros métodos como el de Arkansas y Utah, intentando responder a las realidades locales.

Mientras en Chile la DGA en el proceso de constitución de nuevos derechos de aprovechamiento intenta mantener caudales ecológicos reservando el diez por ciento del caudal medio anual (DGA, 1999).

A.1.3 Método del caudal mínimo de 7 días con período de ocurrencia de 10 años (${}_{7}Q_{10}$)

Este método entrega el valor de un caudal mínimo estadístico ${}_{7}Q_{10}$ que corresponde al valor cuya media en cada diez años será igual o menor que el caudal medio en cualquier evento de 7 días de sequía consecutivos (Silveira y Silveira, 2003). El método supone que a valores menores que éste puede generarse un stress

ecológico, por lo cual, es considerado en algunos países en desarrollo como Brasil aplicable para calcular un caudal ecológico (Benetti et al., 2003).

También existen otras aproximaciones similares utilizando la estadística hidrológica que describe las condiciones de sequía como el “ ${}_7Q_2$ ” y el “ ${}_{10}Q_5$ ”.

A.1.4 Métodos europeos

En varios países de Europa la manera de determinar el caudal mínimo se ha establecido en una norma. En general, el caudal es expresado en base a caudales de estiaje definidos como caudales medios diarios sobrepasado una cierta cantidad de días al año (casi siempre más de 300 días).

Por ejemplo en Suiza, la Ley Federal sobre la protección de las aguas (814.20) establece que:

- a) Se puede reducir al máximo el 20% del Q_{347} (caudal medio diario sobrepasado 347 días del año) cuando el volumen total de agua extraída en una cuenca (contando todos los usos ya existentes) es menor a 1000 l/s.
- b) Se otorgan los derechos de aprovechamiento si el volumen de agua requerido es destinado a proveer de agua potable y la magnitud de este volumen no es mayor a 80 l/s en promedio anual (cuando se extraen aguas superficiales) o el volumen requerido no sobrepase los 100 l/s si se extraen aguas subterráneas.
- c) Si las extracciones de agua se realizan en cursos de agua con caudal permanente, el caudal residual debe ser al menos los indicados en la tabla A II.

Tabla A II Caudal residual según Norma Suiza

Magnitud de Q_{347}	Caudal residual (<i>débits résiduels</i>)
Para un Q_{347} inferior o igual a 60 l/s..... y por cada 10 l/s adicionales.....	50 l/s 8 l/s
Para un Q_{347} inferior o igual a 160 l/s..... y por cada 10 l/s adicionales.....	130 l/s 4,4 l/s
Para un Q_{347} inferior o igual a 500 l/s..... y por cada 100 l/s adicionales.....	280 l/s 31 l/s
Para un Q_{347} inferior o igual a 2 500 l/s..... y por cada 100 l/s adicionales.....	900 l/s 21,3 l/s
Para un Q_{347} inferior o igual a 10 000 l/s..... y por cada 1000 l/s adicionales.....	2 500 l/s 150 l/s
Para un Q_{347} igual o superior a 60 000 l/s.....	10 000 l/s

Fuente: Ley Federal sobre la protección de las aguas (814.20), 1991

Sin embargo estos caudales mínimos requeridos pueden aumentarse dependiendo de los requerimientos de flujo para mantener la calidad de las aguas, la calidad de suelos agrícolas, conservar biotopos poco comunes y garantizar la libre circulación de los peces. Por el contrario, en cada provincia (o “*Canton*”) se puede autorizar que el caudal residual sea menor a lo establecido en a), b) y c) dada la ausencia de poblaciones de peces en los cauces explotados y en general, para asegurar la provisión de agua potable y la irrigación de los campos agrícolas ya existentes.

Por otra parte, en Francia la Ley 84-512 (1984) relativa a la pesca en las aguas dulces y a la gestión de recursos piscícolas, define que el caudal mínimo no puede ser inferior al 10 por ciento del caudal medio interanual, estimado a partir de información de un periodo de al menos 5 años. Sin embargo, en un curso de agua donde el caudal observado es mayor que 80 m³/s, el caudal mínimo puede corresponder hasta el 5 por ciento del caudal medio anual.

En general, todos estos métodos hidrológicos simples no son complejos sobre todo cuando se asumen los valores y porcentajes de estudios previos, además sus costos relativos a los otros tipos de métodos son bajos. En contraposición a lo mismo, ya se conocen sus limitaciones para ser utilizados en zonas semi áridas y áridas (King et al., 1999).

A.1.5 Método “Range of Variability Approach” (Aproximación por Rangos de Variabilidad)

Según sus propios autores este método ha sido ideado para casos en que se tenga como primer objetivo la conservación de los ecosistemas (Richter et al., 1997). Se basa en datos de largos períodos de tiempo donde se describe la variabilidad hidrológica antes y después de instalado un embalse. Se recomienda un sistema de manejo con objetivos anuales intentando emular o “imitar” las características del flujo natural después del funcionamiento de la represa o hidroeléctrica.

El método comprende al menos 6 pasos básicos:

- 1) Caracterización del flujo natural⁶ a través de treinta y dos (32) indicadores de alteración hidrológica (IHA) basados en los parámetros definidos por Richter y colaboradores (1996) (tabla A III). Estos indicadores se agrupan en cinco categorías relacionadas con:
 - I. Magnitud del régimen hídrico mensual.
 - II. Magnitud y duración de los extremos anuales.
 - III. Predictibilidad de los extremos anuales.
 - IV. Frecuencia y duración de las magnitudes extremas altas y bajas.
 - V. Tasa y frecuencia de los cambios hidrológicos.

- 2) Estimación de una tendencia central (ejemplo: mediana o media) y de dispersión (desviación estándar o coeficiente de variación) para los 32 indicadores anteriormente descritos.

- 3) Definición de rangos de variabilidad objetivo para cada indicador, ya sea como un valor máximo de la desviación estándar (por ejemplo, los valores deben caer dentro de la Media ± 1 Desviación Estándar) o los valores pueden ser expresados en relación a niveles de percentil (deben estar comprendidos entre el 20 y 80 percentil). Estos objetivos deben estar basados en información ecológica, sin embargo, los autores recomiendan que frente a la ausencia de la misma se puede utilizar el criterio de ± 1 la Desviación Estándar (SD).
- 4) Diseño de un sistema de manejo de acuerdo a los objetivos de rangos de variación.
- 5) Monitoreo paralelo a un programa de investigación ecológica para determinar los efectos del manejo (una vez que el proyecto comienza su funcionamiento).
- 6) Revisión anual del cumplimiento de objetivos y adaptación de los mismos a los resultados de monitoreo.

La figura A II muestra los valores de caudales registrados en el día del año que el caudal observado fue el máximo antes y después de instalado un embalse en las aguas del río Roanoke (Carolina del Norte). Para este parámetro se estimó un rango de variación máximo de ± 1 la SD. En este caso, los valores de caudales máximos no deberían ser menores a la Media más la Desviación Estándar (Richter et al., 1997).

⁶ El flujo natural se define a través de la revisión de datos hidrológicos de largos periodos de tiempo, de al menos 20 años atrás.

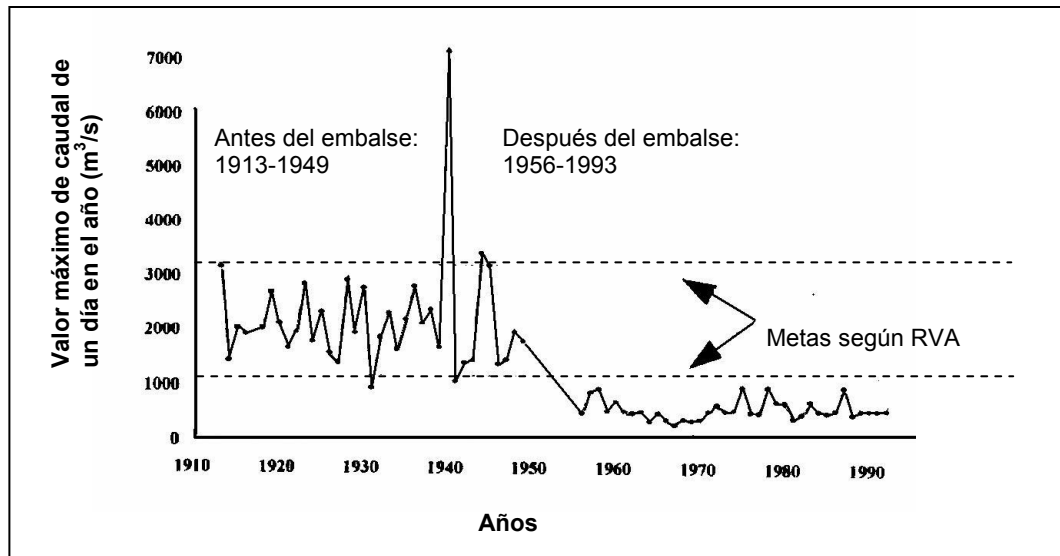


Figura A II. Valores de caudal máximo de un día para cada año en el río Roanoke antes y después instalado un embalse.
 Fuente: Richter et al., 1997. Las líneas punteadas muestran la Media ± 1 la Desviación Estándar

Tabla A III. Parámetros hidrológicos utilizados para definir los indicadores de alteración hidrológica en método RVA

Grupos estadísticos	Elementos del régimen hidrológico	Parámetros hidrológicos
Grupo 1: Magnitud de flujos mensuales	Magnitud, predictibilidad	Promedio mensual del caudal Mínima anual (1 día) Máxima anual (1 día)
Grupo 2: Magnitud y duración de condiciones extremas anuales	Magnitud, duración	Mínima anual (3 días) Máxima anual (3 días) Mínima anual (7 días) Máxima anual (7 días) Mínima anual (30 días) Máxima anual (30 días) Mínima anual (90 días) Máxima anual (90 días)
Grupo 3: Predictibilidad de condiciones extremas anuales	Predictibilidad	Fecha del mes de julio para cada máximo anual de un día Fecha del mes de julio para cada mínimo anual de un día
Grupo 4: Frecuencia y duración de pulsos de caudales altos/bajos	Frecuencia, Duración	Número de pulsos altos cada año Número de pulsos bajos cada año Promedio de la duración de los pulsos altos entre cada año (días) Promedio de la duración de los pulsos bajos entre cada año (días)
Grupo 5: Tasa de cambio/frecuencia de cambio de las condiciones hidrológicas	Tasa de cambio, frecuencia	Promedio de todas las diferencias positivas entre valores de caudales diarios consecutivos Promedio de todas las diferencias negativas entre valores de caudales diarios consecutivos Número de aumentos Números de caídas

Fuente: Richter et al., 1996.

En términos de gestión, en el método RVA puede ser aplicado en una amplia variedad de ecosistemas. En tanto, sus costos son considerados de bajos a medios con una complejidad mayor a la de métodos hidrológicos simples (King et al., 1999).

A.2 Métodos hidráulicos

Estos métodos generalmente se basan en estudios de una sección transversal para así relacionar la magnitud del caudal con la profundidad de los cauces, velocidad y perímetro mojado. Han sido frecuentemente utilizados en Estados Unidos (Reiser et al, 1989) pero se consideran como precursores de otros más sofisticados como los de simulación de hábitat que usan datos de muchas secciones transversales asociadas a información biológica y de micro hábitat. Dentro de éstos, el método del perímetro mojado es uno de los más conocidos y utilizados (Bragg et.al, 1999 y Benetti et.al., 2003).

A.2.1 Método del Perímetro Mojado

En este método se asume que la integridad del hábitat está directamente relacionada con el área húmeda. Consiste básicamente en la construcción de curvas que muestran la relación entre el caudal y el perímetro mojado. A partir de ellas puede observarse que hasta un cierto volumen de agua el perímetro crece rápidamente a medida que aumenta la descarga pero sobrepasado este volumen el perímetro se mantiene casi constante. Generalmente el flujo recomendado es aquel cerca de este punto de inflexión, pues se presume es el nivel óptimo para el desove de peces o para la producción de invertebrados bentónicos (figura AIII) (Stalnaker et al., 1995).

Este método ha sido aplicado principalmente en ríos que presentan secciones transversales relativamente anchas, rectangulares y poco profundas, lo cual no es representativo de todos los ríos (Stalnaker et al., 1995). Por otra parte, los métodos hidráulicos en general presuponen que la morfología del lecho se mantiene estable a lo largo del tiempo y que las pocas secciones transversales estudiadas son representativas de las características generales de los ríos, lo cual hace difícil su aplicación en zonas con elevada variabilidad morfológica como es el caso de los

cursos de agua de regiones semi- áridas (Alves y Bernardo, 2000). Al igual que con métodos hidrológicos simples, no se definen pasos posteriores al cálculo del caudal y sus costos y complejidad son relativamente bajos (King et al., 1999).

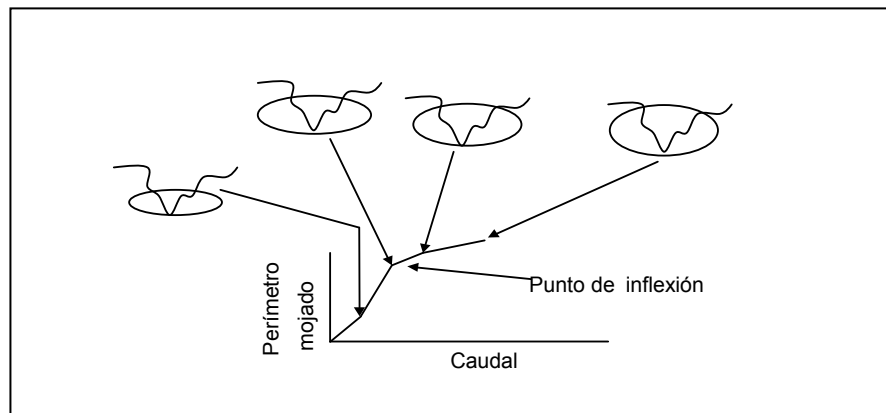


Figura A III. Relación entre caudal y perímetro mojado
Fuente: Stalnaker et al., 1995 (Modificado por el autor).

A.3 Métodos de simulación de hábitat

Entre los métodos de simulación de hábitat el más utilizado y del cual se derivan los demás, se encuentra:

A.3.1 Método de Instream Flow Incremental (IFIM)

Desarrollado por la US Fish and Wildlife Service este método integra modelos analíticos hidráulicos junto con el estudio de la calidad del agua, sedimentos, estabilidad de los canales, temperatura y otras variables que afectan la producción de peces.

Debido a que en este método se presupone que el hábitat de los peces está determinado por las características hidráulicas existen modelos para predecir profundidades y velocidades en función de un cierto caudal. Dentro de estos modelos el más conocido se denomina IFG4. El mismo se calibra y construye a partir de datos

de campo donde se crea una celda por cada punto de medición a lo largo de una transecta. Cada celda tiene una velocidad y profundidad media relacionada con características geomorfológicas del cauce y un caudal particular (Pelissari y Sarmento 2003, Washington Department of Fish and Wildlife, 2003).

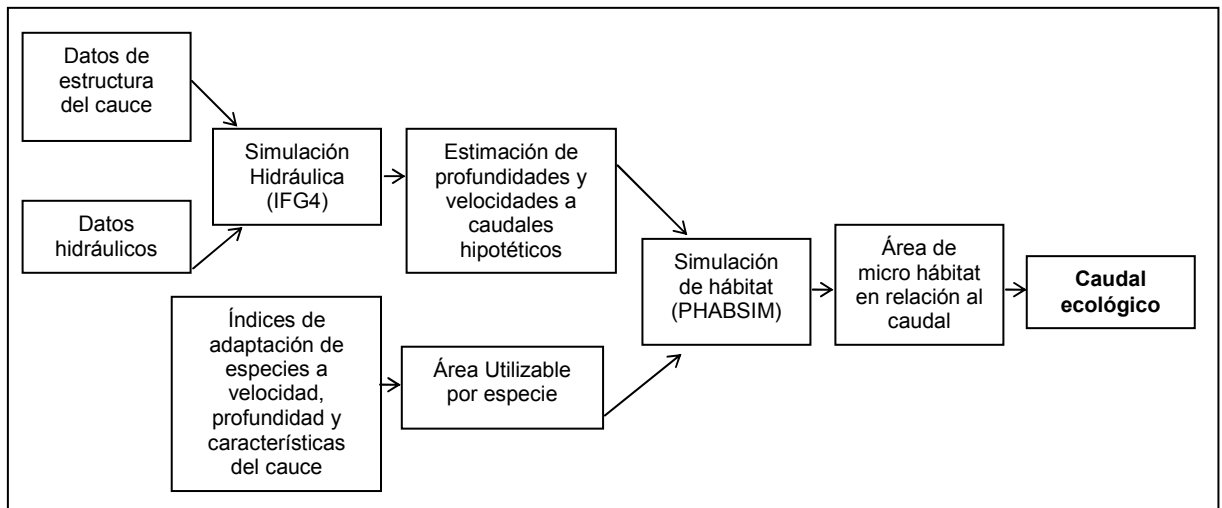


Figura A IV. Esquema de pasos metodológicos para IFIM

Fuente: Pelissari y Sarmento, 2003 (Modificado por el autor).

Por otra parte, se construyen índices y curvas de adaptación por especie para cada variable de velocidad, profundidad y características geomorfológicas. Estos índices pueden construirse de diversas maneras, ya sea por opinión de expertos y/o por observación directa. Las curvas varían dependiendo de la especie y del estado en su ciclo biológico. A continuación, se estima el área utilizable o necesaria para cada especie generalmente relacionando los índices de adaptación con el área de estudio. De esta manera, con la ayuda de un modelo computarizado, usualmente con el Physical Habitat Simulation System (PHABSIM) se estima el área de micro hábitat por especie generado a un cierto caudal. Finalmente, se determina un caudal ecológico como aquel que optimice la relación volumen de agua/área de micro hábitat.

En la figura A V se presentan los resultados de un estudio realizado en el Río Santa Maria da Vitória (Estado Espírito Santo de Brasil). En la misma se muestran curvas que presentan los índices de habitabilidad (o adecuación) para la especie *Astyanax aff. taeniatus* (una de las tres poblaciones de peces estudiadas) a distintos valores de

profundidad, velocidad e “índices del cauce” (el último fue construido por la combinación de valores otorgados a la composición granulométrica de las partículas del sustrato (del 1 al 5) y valores de cobertura de la vegetación (del 1 al 3)). Finalmente, se muestra la curva (B) caudal versus el Área Utilizable Ponderada (AUP).

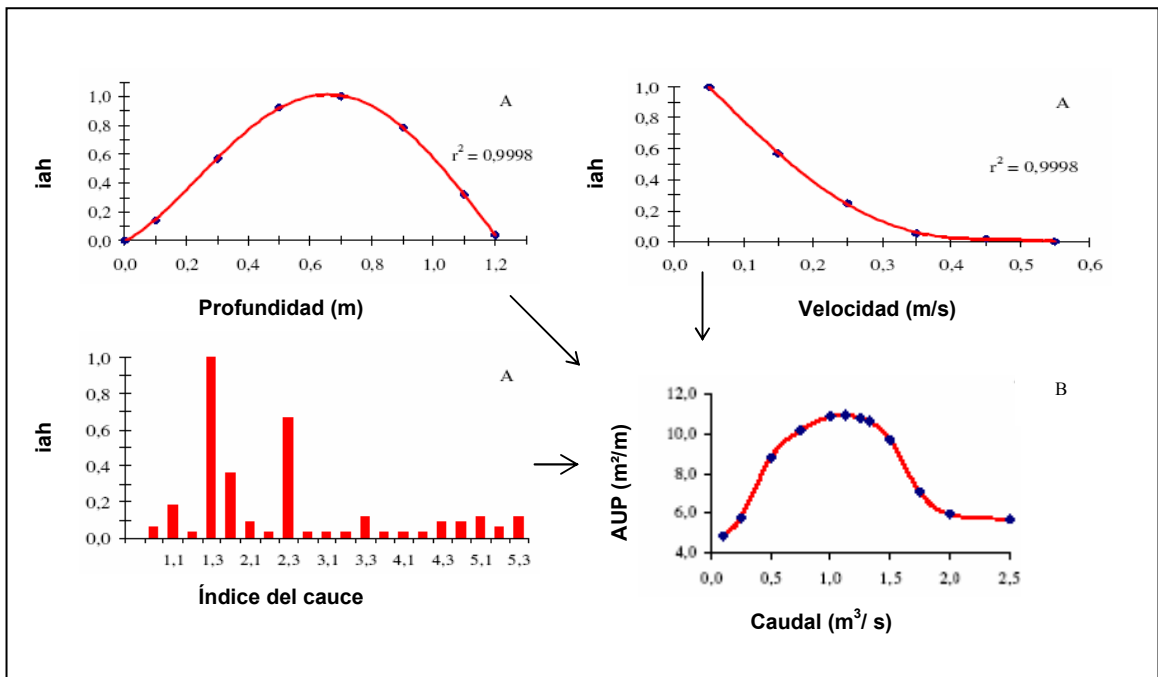


Figura A V. Curvas de índices de habitabilidad (*iah*) para la especie *Astyanax aff.taeniatus* en el río Santa Maria da Vitória y Curva de Área Utilizable Ponderada vs. Caudal

Fuente: Pelissari y Sarmento, 2003

En términos de gestión la aplicabilidad de este método en cursos de agua de regiones semiáridas es restringida por el hecho de que existen caudales muy bajos y con una alta diversidad morfológica lo que impide o dificulta caracterizar el curso de agua en base a algunas transectas (Alves y Bernardo, 2000). En tanto, su complejidad y costos son altos (King et al., 1999).

A.4 Métodos holísticos

Se considera que el régimen hidrológico natural mantiene: 1) la biota de un cauce, 2) la geomorfología del canal, 3) los sistemas riparianos y, 4) sistemas en las áreas de

inundación, así como los sistemas de estuarios y costeros que son afectados por el flujo de agua dulce.

Los métodos holísticos generalmente han adoptado dos aproximaciones distintas o combinan las mismas (Arthington et al., 1998)

- Aproximación de abajo hacia arriba (bottom-up approach): donde el caudal recomendado o la variación del mismo es estimado a partir de un flujo mínimo hacia valores más altos.

- Aproximación de arriba hacia abajo (top-down): el caudal es determinado a partir de un flujo máximo aceptable hasta valores menores intentando emular las características del régimen natural.

Este tipo de método se basa en el juicio de expertos y consiste en jornadas de trabajo que dan como resultado la descripción de un régimen hidrológico mes a mes y elemento por elemento, donde cada elemento representa una característica bien definida del régimen hidrológico asociada a objetivos explícitos y claros ya sean de tipo ecológicos, de calidad de agua y/o sociales (King y Louw, 1998).

En Sur África y algunos Estados de Australia han utilizado diversas variaciones de este tipo de métodos y entre las más comunes se encuentran:

A.4.1 Método de Building Block (BBM) ~ aproximación bottom -up

Este método ha sido concebido para determinar los requerimientos de flujo (IFR, Intream Flow Requirements) para un río o cuenca con la finalidad de apoyar a los organismos gubernamentales en la planificación y lineamientos del manejo del recurso hídrico. Se basa en una jornada de trabajo en equipo de grupos multidisciplinarios donde son sugeridos estos requerimientos a pesar de que exista poco conocimiento del funcionamiento de los ecosistemas. Considera estudios de investigación ya realizados, juicios de expertos y modelos para entender la respuesta caudal – características hidráulicas.

El método comprende tres etapas básicas como se describe a continuación:

Etapas I. Preparación del taller o “workshop”

- a. Identificación del área de estudio y determinación de la integridad del hábitat presente.
- b. Descripción de las características del área y la importancia del río en términos económicos, sociales y ecológicos. Para la estimación de la importancia económica y social se realiza una evaluación de la dependencia social y económica de los ecosistemas ribereños a través de la revisión documental y posteriormente en conjunto con la comunidad. Para la evaluación ecológica se investiga sobre la distribución, abundancia y rareza de las especies, los ecosistemas asociados, etc. Los componentes del ecosistemas que han sido siempre reportados son los peces, las comunidades de plantas riparianas y los invertebrados acuáticos. También se estudian las características geomorfológicas del área de estudio y se evalúan requerimientos de calidad del agua del pasado, presente y futuro.
- c. Identificación de los arroyos y sitios dentro del área que serán especialmente estudiados aportando nuevos datos para el taller.
- d. Descripción del régimen hídrico natural (antes de ser modificado por actividades humanas) y actual, simulando cuando es necesario para así generar curvas de caudal diario y mensual a lo largo del tiempo.
- e. Identificación y descripción en términos de predictibilidad, duración y magnitud de los flujos que se consideran más importantes dentro del rango de flujos que muestran las curvas construidas. Generalmente estos son: grado de perenniabilidad de un río, magnitud de los flujos bases en períodos secos y húmedos, magnitud, frecuencia y duración de las inundaciones en estaciones húmedas y picos de flujos en meses secos.
- f. Determinación del estado deseado de conservación para el área de estudio.

El producto de esta etapa es un documento conteniendo todos los antecedentes para el posterior taller.

Etapa II. Taller del BBM o “BBM workshop”

Estos talleres han sido compuestos por al menos 20 personas entre las cuales se encuentran científicos que colaboran en la primera parte del método, hidrólogos, ingenieros, expertos en modelación hidráulica y aquellos que tienen como tarea el manejo del recurso hídrico. Puede comprender de dos a cuatro días de duración para realizar las siguientes actividades:

- a. Visita a los arroyos escogidos en la primera etapa y descripción de los mismos bajo las distintas perspectivas de los especialistas. Esta información luego es discutida en grupos de trabajo
- b. Identificación preliminar de los requerimientos de flujos para cada mes. Cada especialista debe proponer desde flujos mínimos hasta flujos de inundación. Posteriormente, los hidrólogos relacionan los caudales recomendados con sus efectos en la profundidad, perímetro mojado, velocidad o áreas inundadas. Finalmente entregan diagramas de una sección transversal del río donde se pueden observar las relaciones entre el volumen de agua y sus consecuencias ecológicas facilitando la comprensión para los demás expertos
- c. Determinación y descripción, en términos de duración y magnitud, de los flujos que se quieren mantener en un tiempo determinado del año. Las descripciones de cada uno de los componentes del flujo son consideradas como los “building blocks”. Estos bloques conforman los requerimientos de flujo (IFR) definitivos expresados como un porcentaje del caudal medio anual.

Etapa III. Gestión

Esta etapa guarda mayor relación con la gestión posterior característica de Sur África. Los creadores de esta metodología recomiendan que los gestores con ayuda de especialistas determinen si los IFR recomendados coinciden con los usos actuales y pueden ser realmente mantenidos. También proponen un programa de monitoreo que serviría para retroalimentar el proceso.

La figura AVI muestra algunas características del flujo hídrico natural que son destacadas por King y Louw (1998) con los números del 1 al 6 (parte A), así como también aquel flujo que se recomendaría una vez modificado el caudal por la construcción de un embalse (parte B). Las características 1 y 6 muestran cuán perenne es el río, las características 2, 4 y 5 muestran la diferencia entre estaciones húmedas y secas y la característica 3 muestra el tiempo del primer flujo de inundación para la estación seca.

La figura AVII muestra los bloques de caudal deseados mantener en los distintos meses del año asociados a un objetivo específico.

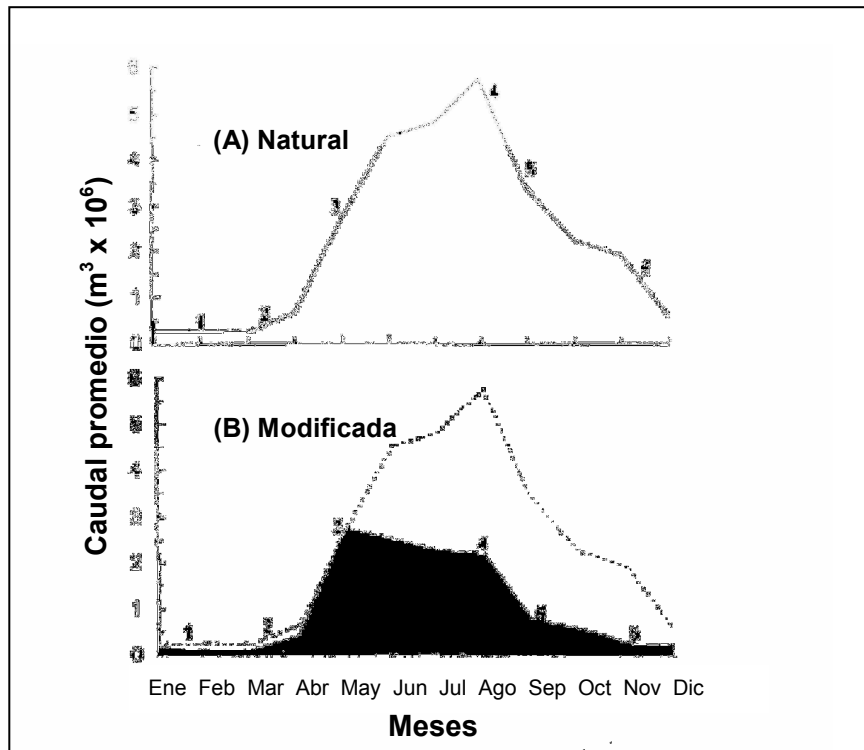


Figura A VI. Características del flujo hídrico.

Fuente: King y Louw, 1998.

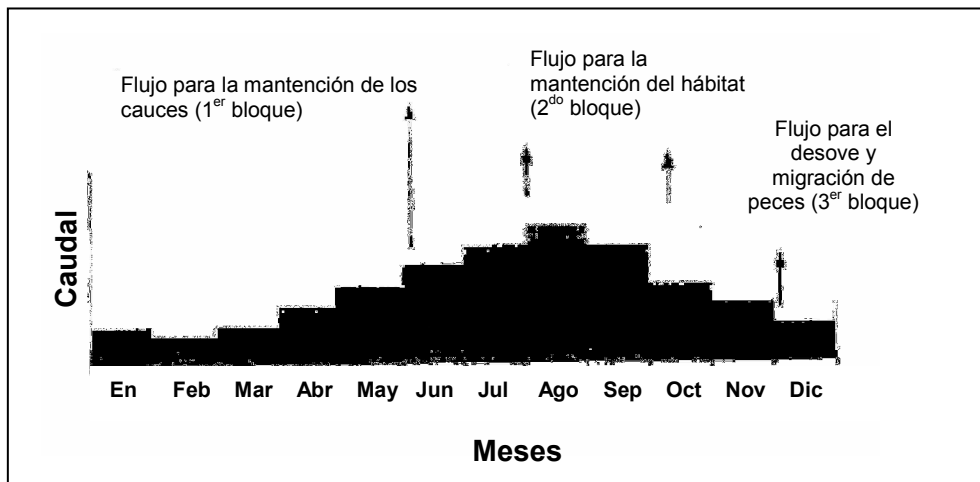


Figura A VII. Bloques hipotéticos. Requerimientos de Flujo (IFR) usando el método Building Block .

Fuente: King y Louw, 1998.

A.4.2 Método de Benchmarking ~ aproximación top-down

Este método se basa en principios similares al método de Building Block. Con información disponible, modelos conceptuales y juicio de experto se identifican indicadores hidrológicos que son considerados ecológicamente relevantes. Con estos indicadores son caracterizados arroyos de referencia o “bench mark reaches”.

En estos cauces de referencia no existe necesariamente un flujo natural pero son escogidos porque cubren variados tipos y niveles de flujo que se registran en la cuenca. En estos cauces se estudian las consecuencias ecológicas que se han producidos por cambios en el flujo natural y se predicen los impactos potenciales frente al incremento del consumo del agua o la instalación de nuevas represas o embalses que modificarían los regimenes actuales de flujo (Brizga et al., 2002).

Esta metodología cuenta con cuatro pasos claves:

- a. Formación de un panel técnico (TAP, Technical Advisory Panel) y desarrollo de un modelo hidrológico para la cuenca hidrográfica.
- b. Determinación y evaluación actual y futura de las condiciones ecológicas de los arroyos en relación con un estado del río conocido.
- c. Evaluación de los riegos ambientales por cambios en el flujo.
- d. Evaluación de escenarios futuros posibles.

Los grupos de trabajo son conformados por especialistas de formación similar a los del método Building Blocks, sin embargo estos deben preguntarse hasta que punto puede modificarse el flujo para alcanzar un objetivo dado.

Como se aprecia, los métodos de tipo holísticos son bastantes más complejos dado que se requiere un esfuerzo más grande de gestión para coordinar los grupos de trabajos, salidas a terreno, etc., de esta manera sus costos también se elevan. Sin embargo, en términos generales pueden ser aplicados en cualquier ecosistema lótico (King et al., 1999).

10. ANEXO 2

Fichas de proyectos (tipo “a.1” y “c” según Ley 19.300) a los cuales se les exigió un Estudio de Impacto Ambiental

Proyectos IV Región

Nombre del Proyecto: Embalse Illapel	Región: IV	Nº de Ficha: 1
Titular: MOP	Consultora: EMG Consultores S.A, emg@emg.cv.cl	
Fecha de presentación: 22/11/99	Fecha de Addenda: Addendum II (5/10/2000)	
Fecha de RCA: 2/11/2000	Fecha de puesta en marcha: Aún no ha sido puesta en marcha	
Impacto: Pérdida de hábitat	Medida: entregar un caudal permanente o ecológico	Objetivo: asegurar condiciones de hábitat
Método de cálculo de caudal ecológico: <u>a) Hidrológico simple</u> , RVA b) Hidráulico, C) de simulación de hábitat, D) holístico		
Seguimiento: SI NO <u>X</u>		
Fuente: www.e-seia.cl y conversación directa con Mónica Musalem (Departamento de Conservación DGA Central)		

Nombre del Proyecto: Embalse Corrales	Región: IV	Nº de Ficha: 2
Titular: MOP	Consultora: SRK ingenieros consultores, fono:2-2690353	
Fecha presentación: 22/8/98	Fecha de Addenda: Addendum I (2/7/99), Addendum II (17/9/99)	
Fecha de RCA: 22/10/1999	Fecha de puesta en marcha: operación parcial en 2001	
Impacto: relacionados con la vegetación y flora acuática, fauna íctica y recursos hídricos	Medida: entregar un caudal ecológico	Objetivo: Mitigar impactos
Método de cálculo de caudal ecológico: a) <u>Hidrológico simple</u> , RVA b) Hidráulico, C) de simulación de hábitat, D) holístico		
Seguimiento: SI <u>X</u> NO		
Fuente: www.e-seia.cl, documentos de seguimiento		

Proyectos VI Región

Nombre del Proyecto: Convento Viejo Etapa II	Región: VI	Nº de Ficha: 3
Titular: MOP	Consultora: Representante legal Francisco Aldunate	
Fecha de presentación: 14/8/2004	Fechas de c/ Addendum: 15/12/2003 (I) ,11/2/2004 (II)	
Fecha de RCA: 8/8/04	Fecha de puesta en marcha: No se ha puesto en marcha	
Impacto: relacionados con biota acuática y calidad del agua	Medida: establecer un caudal mínimo ecológico	Objetivo: mitigar impactos en estero Chimborango
Método de cálculo de caudal ecológico: a) <u>Hidrológico simple</u> , RVA b) Hidráulico, C) de simulación de hábitat, D) holístico		
Seguimiento: SI <u>NOX</u>		
Fuente: www.e-seia.cl y conversación directa con Mónica Musalem (Departamento de Conservación DGA Central)		

Nombre del Proyecto: Proyecto Hidroeléctrico La Higuera	Región: VI	Nº de Ficha: 4
Titular: Hidroeléctrica La Higuera S.A	Consultora: Representante Legal Fernando Baraona del Río	
Fecha de presentación: 6/2/04	Fecha de Addenda: 10/5/04 (I)	
Fecha de RCA: 31/8/04	Fecha de puesta en marcha :No se ha puesto en marcha	
Impacto: Alteración del hábitat para la flora y fauna acuática	Medida: mantener caudales superiores a un caudal ecológico	Objetivo: mantener el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial
Método de cálculo de caudal ecológico: a) <u>Hidrológico simple</u> , RVA b) Hidráulico, C) de simulación de hábitat, D) holístico		
Seguimiento: SI <u>NOX</u>		
Fuente: www.e-seia.cl, conversación directa con Mónica Musalem (Departamento de Conservación DGA) y documentos		

Proyectos de VI y VII Región

Nombre del Proyecto: Central Hidroeléctrica Alto Cachapoal	Región: VI	Nº de Ficha: 5
Titular: Constructora Andrade Gutiérrez SA	Consultora: Geotécnica Consultores GC, serviciosambientales@geotecnica.cl	
Fecha de presentación: 10/10/95 (ingreso voluntario) Aún no hay reglamento	Fecha de Addenda:	
Fecha de RCA: 13/8/96	Fecha de puesta en marcha:	
Impacto:	Medida:	Objetivo:
Método de cálculo de caudal ecológico: a) Hidrológico, b) Hidráulico, C) de simulación de hábitat, D) holístico		
Seguimiento: SI NO		
Fuente:		

Nombre del Proyecto: Central Hidroeléctrica Loma Alta	Región: VII	Nº de Ficha: 6
Titular: Pehuenche SA	Consultora: TESAM SA	
Fecha de presentación: 18/5/95 (ingreso voluntario) Aún no hay reglamento	Fecha de Addenda:	
Fecha de RCA: 9/7/95	Fecha de puesta en marcha:	
Impacto:	Medida:	Objetivo:
Método de cálculo de caudal ecológico: a) Hidrológico simple, RVA b) Hidráulico, C) de simulación de hábitat, D) holístico		
Seguimiento: SI NO		
Fuente:		

Proyectos de VIII Región

Nombre del Proyecto: Central Hidroeléctrica Quilleco	Región: VIII	Nº de Ficha: 7
Titular: Empresa Eléctrica Colbún Machicura SA	Consultora: Electrowatt Ing.Cons. S.A, ewechile@entelchile.net	
Fecha de presentación:9/10 /98	Fecha de Addenda:	
Fecha de RCA: 26/12/00	Fecha de puesta en marcha: No está en marcha	
Impacto: impactos sobre el componente agua y fauna acuática	Medida: Mantener un caudal mínimo de sostenimiento ecológico	Objetivos: conservar paisaje, hábitat, biodiversidad, etc
Método de cálculo de caudal ecológico: a) Hidrológico simple, RVA, b) Hidráulico, C) <u>de simulación de hábitat(IFIM)</u> , D) holístico		
Seguimiento: SI NOX		
Fuente: Estudios en Empresa Eléctrica Colbún Machicura SA(en www.e-seai.cl no hay archivos descargables), sólo la presentación en digital y otros documentos en biblioteca de CONAMA (Cod de bodega E8-424, 425)		

Nombre del Proyecto: Central Hidroeléctrica Rucue	Región: VIII	Nº de Ficha: 8
Titular: Empresa Eléctrica Colbun Machicura SA	Consultora: Electrowatt Ing. Cons. SA	
Fecha de presentación: <u>23/4/96</u> (ingreso voluntario) Aún no hay reglamento	Fecha de Addenda:	
Fecha de RCA: 27/11/96	Fecha de puesta en marcha:	
Impacto:	Medida:	Objetivo:
Método de cálculo de caudal ecológico: a) Hidrológico simple, RVA, b) Hidráulico, C) de simulación de hábitat, D) holístico		
Seguimiento: SI NO		
Fuente: www.e-seia.cl		

Proyectos de VIII Región

Nombre del Proyecto: Central Hidroeléctrica Quilleco	Región: VIII	Nº de Ficha: 7
Titular: Empresa Eléctrica Colbún Machicura SA	Consultora: Electrowatt Ing.Cons. S.A, ewechile@entelchile.net	
Fecha de presentación:9/10 /98	Fecha de Addenda:	
Fecha de RCA: 26/12/00	Fecha de puesta en marcha: No está en marcha	
Impacto: impactos sobre el componente agua y fauna acuática	Medida: Mantener un caudal mínimo de sostenimiento ecológico	Objetivos: conservar paisaje, hábitat, biodiversidad, etc
Método de cálculo de caudal ecológico: a) Hidrológico simple, RVA, b) Hidráulico, C) <u>de simulación de hábitat(IFIM)</u> , D) holístico		
Seguimiento: SI NOX		
Fuente: Estudios en Empresa Eléctrica Colbún Machicura SA(en www.e-seai.cl no hay archivos descargables), sólo la presentación en digital y otros documentos en biblioteca de CONAMA (Cod de bodega E8-424, 425)		

Nombre del Proyecto: Central Hidroeléctrica Rucue	Región: VIII	Nº de Ficha: 8
Titular: Empresa Eléctrica Colbun Machicura SA	Consultora: Electrowatt Ing. Cons. SA	
Fecha de presentación: <u>23/4/96</u> (ingreso voluntario) Aún no hay reglamento	Fecha de Addenda:	
Fecha de RCA: 27/11/96	Fecha de puesta en marcha:	
Impacto:	Medida:	Objetivo:
Método de cálculo de caudal ecológico: a) Hidrológico simple, RVA, b) Hidráulico, C) de simulación de hábitat, D) holístico		
Seguimiento: SI NO		
Fuente: www.e-seia.cl		

Proyectos de VIII Región

Nombre del Proyecto: Central Hidroeléctrica Quilleco	Región: VIII	Nº de Ficha: 7
Titular: Empresa Eléctrica Colbún Machicura SA	Consultora: Electrowatt Ing.Cons. S.A, ewechile@entelchile.net	
Fecha de presentación:9/10 /98	Fecha de Addenda:	
Fecha de RCA: 26/12/00	Fecha de puesta en marcha: No está en marcha	
Impacto: impactos sobre el componente agua y fauna acuática	Medida: Mantener un caudal mínimo de sostenimiento ecológico	Objetivos: conservar paisaje, hábitat, biodiversidad, etc
Método de cálculo de caudal ecológico: a) Hidrológico simple, RVA, b) Hidráulico, C) <u>de simulación de hábitat(IFIM)</u> , D) holístico		
Seguimiento: SI NOX		
Fuente: Estudios en Empresa Eléctrica Colbún Machicura SA(en www.e-seai.cl no hay archivos descargables), sólo la presentación en digital y otros documentos en biblioteca de CONAMA (Cod de bodega E8-424, 425)		

Nombre del Proyecto: Central Hidroeléctrica Rucue	Región: VIII	Nº de Ficha: 8
Titular: Empresa Eléctrica Colbun Machicura SA	Consultora: Electrowatt Ing. Cons. SA	
Fecha de presentación: <u>23/4/96</u> (ingreso voluntario) Aún no hay reglamento	Fecha de Addenda:	
Fecha de RCA: 27/11/96	Fecha de puesta en marcha:	
Impacto:	Medida:	Objetivo:
Método de cálculo de caudal ecológico: a) Hidrológico simple, RVA, b) Hidráulico, C) de simulación de hábitat, D) holístico		
Seguimiento: SI NO		
Fuente: www.e-seia.cl		