

GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL EN LA CUENCA DEL RÍO LOA



GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL EN LA CUENCA DEL RÍO LOA

Guía desarrollada por el Centro de Ecología Aplicada Ltda. (CEA) como parte del desarrollo del Estudio “Diagnóstico del Caudal Ambiental del río Loa, Región de Antofagasta”, Código BIP: 30130919.

Contraparte técnica del estudio: Roberto Villablanca, encargado de la sección de Recursos Naturales, Residuos y Riesgo Ambiental, SEREMI del Medio Ambiente, región de Antofagasta

Santiago, 2019

Equipo profesional CEA

Nombre	Profesión y/o especialidad
Cristián Godoy	Ingeniero Civil Hidráulico, PhD (c)
Alejandro Aguado	Ingeniero Civil Hidráulico
Ítalo Serey	Biólogo, PhD.
Manuel Contreras	Biólogo, M.S, PhD

ÍNDICE

1	PRÓLOGO	6
2	INTRODUCCIÓN.....	7
3	GLOSARIO.....	9
4	BASES PARA LA ESTIMACIÓN.....	10
4.1	Aproximación teórica a los ríos.....	10
4.1.1	Enfoque eco-hidro-geomorfológico.....	10
4.1.2	Niveles de Organización Ecológica.....	11
4.1.2.1	Ecosistema.....	11
4.1.2.2	Especies y Hábitat.....	12
4.1.3	Factores Ambientales Forzantes	12
4.1.4	Régimen del Caudal	13
4.1.5	Salinidad.....	14
4.1.6	Escalas Espacio -Temporales	15
4.2	Definición del método y desarrollo del caudal ambiental	15
4.2.1	Consideraciones en la definición del método.....	15
4.2.2	Desarrollo del caudal ambiental.....	20
4.3	Definición de ecosistemas potenciales	24
4.3.1	Uso del Agua y Ecosistemas	24
4.3.2	Ecosistemas naturales, híbridos y nuevos.....	24
4.3.3	Ecosistemas, Estabilidad y Resiliencia	25
4.3.3.1	Estado Único	26
4.3.3.2	Estados Múltiples	26
4.3.4	Concepto de Referencia Ecológica.....	27
4.3.4.1	Concepto de Referencia de la Directiva del Agua.	27
4.3.4.2	Condiciones de referencia y restauración.....	28
4.3.5	Criterios para la definición de condiciones de referencia	28
4.3.5.1	Caudal Ambiental	28
4.3.5.1.1	Paradigma del régimen del caudal natural.....	29
4.3.5.1.2	Paradigma del Diseño del Caudal	30
4.3.5.2	Componentes Biológicos.....	31
5	METODOLOGÍAS PARA ESTIMAR EL CAUDAL AMBIENTAL.....	32
5.1	Etapas 1: Recopilación/levantamiento de información para la descripción del sistema fluvial.....	34
5.1.1	Caracterización hidrológica	35
5.1.2	Caracterización morfológica	36
5.1.2.1	Caracterización a nivel de Macroescala	36
5.1.2.2	Caracterización a nivel de Mesoescala	40

5.1.3	Otras caracterizaciones	43
5.2	Etapas 2: Definición de variables relevantes del sistema y determinación de la condición no alterada o “natural” del sistema	44
5.2.1	Hidrología del sistema	44
5.2.2	Otras variables relevantes del sistema	46
5.3	Etapas 3: Análisis de la biota y servicios ecosistémicos del sistema	47
5.3.1	Biota presente en el sistema.....	47
5.3.2	Usos y servicios del agua en la cuenca	50
5.3.3	Clasificación CICES	50
5.4	Etapas 4: Definición de ecosistemas en condición de referencia (“natural”) y actual	52
5.4.1	Aproximación Metodológica para las “Condiciones de Referencia”.....	52
5.4.1.1	Área de los Ecosistemas, Especies y Hábitat.....	54
5.4.2	Definición Áreas de Evaluación de la Condición	55
5.5	Etapas 5: Evaluación del estado de hábitat y servicios ecosistémicos en condición “natural”, definición del criterio y estimación del régimen del caudal ambiental	56
5.5.1	Evaluación de la condición del hábitat potencial y condición de desarrollo de servicios ecosistémicos bajo condición “natural”	56
5.5.1.1	Aproximaciones y métodos para el análisis del caudal ambiental	56
5.5.1.2	Aplicación de metodologías al río Loa	58
5.5.1.2.1	Simulación hidráulica.....	58
5.5.1.2.2	Simulación de hábitat y desarrollo de servicios ecosistémicos	59
5.5.2	Definición del criterio para el caudal ambiental respecto de la condición “natural”	65
5.5.3	Estimación del régimen de caudal ambiental.....	69
5.5.4	Consideraciones sobre la interpretación del régimen de caudal ambiental definido.....	72
5.5.4.1	Ejemplo de integración del caudal ambiental	76
5.5.4.2	Ejemplo de gestión del caudal ambiental	77
6	ETAPAS PARA LA EVALUACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL.....	78
6.1	Etapas 6: Configuración actual del sistema y definición de escenarios futuros de la disponibilidad de agua para la evaluación.	79
6.2	Etapas 7: Evaluación de la condición actual y futura, considerando escenarios futuros de disponibilidad de agua. Comparación mediante valoración de la presencia de la biota y del desarrollo de los servicios ecosistémicos de escenarios respecto del caudal ambiental definido.	83
6.3	Etapas 8: Optimización y mejora en el uso del recurso según la priorización de los servicios ecosistémicos, realizada en base al criterio y objetivo establecido por parte de usuarios y actores relevantes.	85
7	REFERENCIAS	86

1 PRÓLOGO

Los ecosistemas acuáticos continentales se encuentran continuamente expuestos a presiones, de tipo natural y antropogénicas. Estas presiones generan alteraciones físicas y químicas de los cuerpos de agua, pérdida y degradación de los hábitats, disminución del caudal, sobreexplotación, contaminación e introducción de especies exóticas que contribuyen a la pérdida de biodiversidad y generan escenarios de riesgo para la salud de las personas y el ecosistema en general. Esta situación se ve particularmente evidenciada en los sistemas hídricos del norte de Chile, como por ejemplo el río Loa, debido a su fragilidad, y a que están limitados principalmente por las extremas condiciones climáticas y morfológicas del territorio.

Actualmente, la cuenca del río Loa se encuentra expuesta a una elevada presión de uso, lo que, sumado al bajo caudal medio anual del río, contribuye a la degradación de los ecosistemas acuáticos, lo que trae como consecuencia un aumento en las condiciones de estrés sobre la biota y la pérdida de biodiversidad. Además, genera la pérdida de servicios ecosistémicos y la disminución de recursos hídricos disponibles para fines productivos.

Una de las maneras de dar sostenibilidad a los ecosistemas fluviales, así como a los servicios ecosistémicos que estos proveen, es el establecimiento del caudal ambiental que tienen los ríos y sus humedales asociados. El caudal ambiental se define como el caudal mínimo necesario para mantener el ecosistema asociado al cauce, de acuerdo con los requerimientos o demanda ambiental necesaria para la preservación del medio ambiente. Es considerado, por tanto, una herramienta de gestión del recurso hídrico en una cuenca, en distintos escenarios, tanto de escasez de agua como de alta demanda. Para el caso del río Loa, el cálculo del caudal ambiental toma alta relevancia, dado que provee de recursos hídricos para la población y para actividades productivas que sostienen la economía local, especialmente de los grupos más vulnerables y además constituye la base para el sustento de ecosistemas de alta relevancia ambiental, tal como los sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad, “cuenca Alto Loa”, “oasis de Quillagua”, “oasis de Calama” y “desembocadura del río Loa”.

Establecer caudales ambientales, por lo tanto, contribuye a la estabilidad de los sistemas acuáticos y a la disponibilidad del recurso hídrico en tiempo de escases, contribuyendo de manera decisiva a la salud de los ríos, al desarrollo económico y a combatir la pobreza. Es por estos motivos que se ha propuesto realizar un diagnóstico ambiental de la cuenca del río Loa mediante la determinación del caudal ambiental, su valorización económica-social y la construcción de un modelo que permita una gestión sustentable del recurso, su protección y disponibilidad de herramientas para la toma de decisiones.

Hoy más que nunca se hacen necesarios cambios que abarquen a toda la sociedad, pues ya no solo son los elementos económicos, sociales, políticos y tecnológicos, los que se ponen sobre la balanza, sino también la protección de la naturaleza y la biodiversidad como elemento sustancial para enfrentar los escenarios de cambio climático y para sostener los procesos de desarrollo sostenible, pues como ha señalado el Presidente Sebastián Piñera, el desarrollo es sustentable o no va a ser un verdadero desarrollo.

En ese sentido, la guía que a continuación se desarrolla, permitirá contar con una herramienta adecuada al contexto territorial, ambiental y social de la cuenca del río Loa, útil en diversos ámbitos, como la planificación regional del recurso hídrico, la conservación biológica, la evaluación ambiental, entre otros.

Rafael Castro Meza
Secretario Regional Ministerial del Medio Ambiente
Región de Antofagasta

2 INTRODUCCIÓN

Actualmente, la cuenca del río Loa se encuentra expuesta a una elevada presión de uso, especialmente asociada al desarrollo minero de este territorio, al desarrollo agrícola en las zonas aledañas a los poblados de Chiu-Chiu y Calama, y al consumo humano. Esta continua presión de uso, sumado al bajo caudal medio anual del río Loa, contribuye a la degradación de los ecosistemas acuáticos, lo que puede traer como consecuencia un aumento en las condiciones de estrés sobre la biota y la pérdida de biodiversidad. Además, puede generar la pérdida de servicios ecosistémicos y una disminución de los recursos hídricos disponibles para otros fines productivos.

Por lo anterior, se desarrolló la guía metodológica para la determinación y evaluación del caudal ambiental en el río Loa, la cual busca el poder evaluar de forma más precisa los requerimientos del río. La definición del caudal ambiental considerada corresponde a la contenida en la Declaración de Brisbane del año 2007: *“los caudales ambientales (o ecológicos) son los flujos de agua, el momento de su aplicación y la calidad de las aguas precisos para mantener los ecosistemas de agua dulce y de los estuarios, así como los medios de subsistencia y bienestar de las personas que dependen del ecosistema”*.

Así, el caudal ambiental se entiende como aquel caudal que permite que se puedan desarrollar y sostener los servicios ecosistémicos de interés. Este no necesariamente es un único caudal para toda la cuenca ni para todas las épocas del año, si no que puede variar en los distintos tramos del río y sus afluentes, además de variar según mes o estación del año.

La presente guía establece las bases de la metodología para el cálculo del caudal ambiental en los distintos tramos de la red hídrica de la cuenca del río Loa, y guía su implementación. El anterior estándar en nuestro país, correspondía a la utilización de metodologías de cálculo de los requerimientos hídricos mediante métodos como el caudal ecológico de la DGA, el cual está basado principalmente en la estadística de caudales y la utilización de criterios de tipo experto.

Actualmente, existe un desarrollo previo respecto de la estimación de caudales ambientales asociados al desarrollo de proyectos de centrales hidroeléctricas, la cual corresponde a la “Guía Metodológica para Determinar el Caudal Ambiental para Centrales Hidroeléctricas en el SEIA” (SEA, 2016). Esta guía, en comparación con una metodología basada en estadística, presenta un enfoque más integral e incorpora variables ambientales del sistema al análisis, en busca de una evaluación integrativa de los requerimientos de todas las componentes, tanto bióticas como abióticas que depende (y utilizan) del río.

La Guía del SEA contiene y compartirá con el presente desarrollo, muchas definiciones y conceptos sobre la ecología, funcionamiento, servicios ecosistémicos, condición y necesidades de un río, ya que ambas están basadas en el concepto de caudal ambiental. Aun así, la primera y fundamental diferencia entre ellas, está dada por el objetivo (y alcance del análisis) de fondo de la determinación del caudal ambiental.

La presente guía considera al río de forma integral, reconociendo su conectividad y dependencia entre los tramos y variables, lo que obliga a realizar un análisis completo del sistema sin el descartar *a priori* los efectos y respuestas sinérgicas, propias de un sistema continuo como lo son los ríos de nuestro país. Además, el análisis propuesto en la Guía del SEA está enmarcado en la evaluación de proyectos en el SEIA, el cual exige un análisis para la condición actual del sistema (Línea de base del proyecto) y no exige considerar una

condición más natural del sistema, que en estricto rigor, es sobre la cual se deben realizar los análisis del caudal ambiental. Así, la presente guía basa el análisis en una condición “natural” (o lo más natural posible con el conocimiento del sistema) de los flujos en él, descontando las alteraciones externas y antrópicas del caudal.

En cuanto al uso de esta guía, ella podrá ser utilizada por los principales actores en la gestión del recurso hídrico en la cuenca, tales como servicios públicos asociados al tema, universidades, y todos aquellos actores con interés en participar en la mejora del uso del recurso del sistema. Esto tendrá beneficios directos sobre la gestión del recurso hídrico en la cuenca, considerando las distintas variables ambientales que conforman el sistema y que son evaluadas de forma integrativa en el desarrollo de la metodología.

El río Loa pertenece a una cuenca muy particular, ya que los eventos de precipitación se concentran en la parte alta de la cuenca y en la época estival. Además, corresponde al río de mayor extensión de Chile, y que se desarrolla en una de las zonas más áridas del mundo. Por lo anterior, el análisis del caudal ambiental del sistema es necesario para poder determinar cuál es la condición actual del sistema intervenido respecto de la condición deseable (caudal ambiental), poder evidenciar la posible existencia de recursos disponibles para ser utilizados, visibilizar la necesidad de una reparación del sistema, proyectar el uso futuro, entre otras.

3 GLOSARIO

AEC: Área(s) de Evaluación de la Condición

AIA: Área(s) de Importancia Ambiental

AIE: Área(s) de Importancia Ecológica

AUA: Área(s) de Usos Antrópicos

CEA: Centro de Ecología Aplicada Ltda.

CICES: Clasificación Internacional Común de los Servicios de los Ecosistemas

CSE: Cascada de los Servicios Ecosistémicos

DGA: Dirección General de Aguas

HPU: Hábitat Ponderado Útil

MMA: Ministerio del Medio Ambiente

MOP: Ministerio de Obras Públicas

Q: Caudal

Qamb: Caudal ambiental

QPexc: Caudal de probabilidad de excedencia

SE: Servicio(s) Ecosistémico(s)

SEA: Servicio de Evaluación Ambiental

Sistema Fluvial: Corresponde a la red hídrica superficial que conforma la cuenca del río Loa incluyendo sus riberas. Considera el río y sus afluentes.

4 BASES PARA LA ESTIMACIÓN

4.1 Aproximación teórica a los ríos

Para el desarrollo de la guía se ha elegido una base ecológica que facilite la toma de decisiones por parte de la autoridad, dada la complejidad de los sistemas naturales, y de la necesidad que las autoridades tienen de operar sobre el territorio y los caudales de los ríos.

El enfoque conceptual elegido se centra en el estudio interdisciplinario de los ecosistemas fluviales, desarrollado por Dollar et al. (2007). Comprender y gestionar el comportamiento de los ríos como ecosistemas requiere enfoques holísticos e interdisciplinarios. Sin embargo, carecemos de enfoques apropiados para guiar el pensamiento interdisciplinario porque los paradigmas disciplinarios pierden su utilidad en el área interdisciplinaria. Los enfoques conceptuales son herramientas útiles con las cuales ordenamos fenómenos y materiales, revelando así patrones y procesos. El enfoque presenta jerarquías paralelas en la geomorfología, hidrología y ecología de un río con diferentes elementos organizativos y niveles de organización para cada disciplina. Asigna escalas espaciales y temporales a cada nivel de organización para las diferentes Jerarquías de disciplinas mediante las cuales diferentes partes pueden distinguirse por diferentes frecuencias de ocurrencia y / o tasas de cambio. La integración de las diferentes disciplinas, dentro del contexto de un estudio particular, está representada por un modelo de cadena de flujo que describe las interacciones entre los procesos que pueden cambiar un ecosistema de un estado (una plantilla) de heterogeneidad biofísica a otro (un producto). El enfoque se aplica describiendo primero en detalle los niveles de organización relevantes que caracterizan a los diferentes subsistemas del sistema fluvial en el contexto del problema que se aborda. A esto le sigue la identificación de variables y escalas adecuadas dentro de los diferentes niveles de organización, las interacciones entre los niveles y los efectos de retroalimentación.

4.1.1 Enfoque eco-hidro-geomorfológico

Los ríos son sistemas complejos, su forma y conducta reflejan las interacciones entre procesos geomorfológicos, hidrológicos y ecológicos, y en nuestro análisis, las disciplinas se visualizan como jerarquías (Figura 4.1). Ecológicamente la comprensión de los ríos ha avanzado y se ha desarrollado una aproximación multidisciplinaria y holística (Dollar et al, 2007), que entrega una base conceptual para el análisis de numerosos problemas en ecología de ríos. Dicha aproximación propone la integración de jerarquías paralelas basadas en tres disciplinas: geomorfología, hidrología y ecología. Cada una de ellas con distintos elementos organizacionales y niveles para cada disciplina (Thoms y Parsons, 2002; Vaughan et al, 2009). La geomorfología es básica para la biodiversidad y el funcionamiento ecosistémico, ya que el patrón de los canales provee hábitats para la biota y la base física para los procesos ecosistémicos (Elosegi et al, 2010). Esto significa integrar aspectos de la cuenca, la red hidrológica como la magnitud o volumen del régimen del caudal con los niveles de organización en ecología.

Las tres jerarquías solamente pueden ser integradas para resolver un problema particular o específico después de un escalamiento apropiado de las estructuras organizacionales respectivas, por lo tanto, produciendo jerarquías escaladas (Dollar et al. 2007).

La asignación del agua del río se ha transformado en el objetivo clave del manejo para sostener los ecosistemas naturales, para rehabilitar ríos degradados por sobre extracción o regulación del caudal, y para proteger la biodiversidad, a nivel mundial. El manejo de los caudales ambientales frecuentemente está relacionado con la pregunta: ¿Qué cantidad de

agua se requiere para conservar y proteger la función del río? Desde una perspectiva geomorfológica, la asignación de agua se requiere para mantener la estructura y función de hechos físicos naturales de los canales del río. Desde la perspectiva biológica, la asignación de agua es requerida para mantener los individuos, poblaciones, comunidades y procesos ecosistémicos. Sin embargo, una aproximación interdisciplinaria, ve la asignación ambiental de agua en un contexto espacial y temporal que considera las uniones claves entre geomorfología, hidrología y ecología, y reconoce las restricciones desde los niveles altos e influencias desde los niveles bajos en la jerarquía organizacional, que puede venir desde variados procesos ambientales e institucionales. De lo anterior, la base de trabajo cambia desde un foco de asignación de agua que es orientado a una única especie, dentro de un contexto disciplinario, a uno que considera múltiples interacciones entre biota, estructura física y procesos hidrológicos (Dollar et al, 2007).

Jerarquías Organizacionales

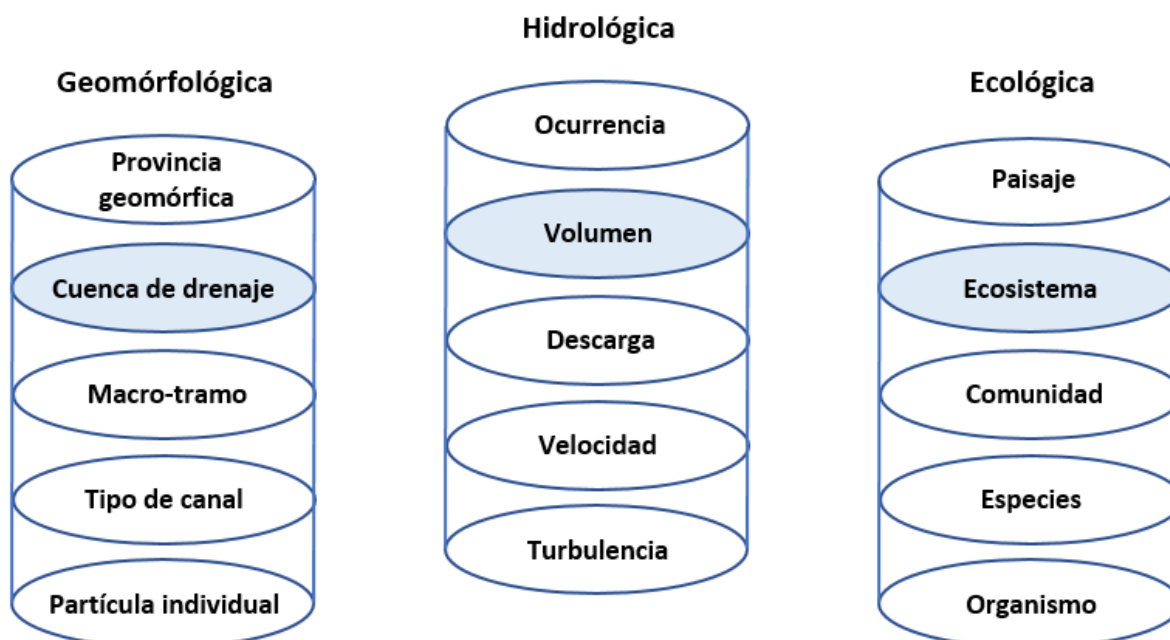


Figura 4.1. Niveles de Organización Jerárquica interdisciplinario para la definición de caudal ambiental. Fuente: Modificado de Dollar et al, 2007.

4.1.2 Niveles de Organización Ecológica

4.1.2.1 Ecosistema

Este nivel es seleccionado para el análisis del río desde el punto de vista ecológico, y requiere ser precisado en su uso específico en el contexto de este estudio, siguiendo la idea central en ecología. Frecuentemente en los estudios ambientales, el concepto de ecosistemas es considerado como una metáfora como un contexto del análisis. En este estudio se usa una aproximación más cercana a la original de Tansley (1935), y del enfoque de significado propuesto por Pickett y Cadenasso (2002).

Debido a que Tansley deseaba enfatizar las uniones entre los componentes bióticos y abióticos del ecosistema, eligió un término desde la física “sistema” que iluminara las interacciones. La

potencia de la definición articulada por Tansley (1935) que es aplicable a cualquier caso donde procesos físicos y biológicos interactúen en alguna manera especial. Un aspecto de interés es el desarrollo de modelos orientados a la diversidad. El foco de esta área incluye riqueza de especies, identidad de las especies, especies claves, grupos funcionales y reglas de unión en procesos ecosistémicos. El objetivo de esos modelos es aclarar el rol de distintos tipos de diversidad biológica en la función ecosistémica (Pickett y Cadenasso, 2002).

Siguiendo la idea de Tansley, se ha definido ecosistema como “una comunidad biótica o ensamblaje y su ambiente físico asociado en un lugar específico” (Pickett y Cadenasso, 2002). A continuación, en la Figura 4.2 se presenta un modelo conceptual de las interacciones ecosistémicas.

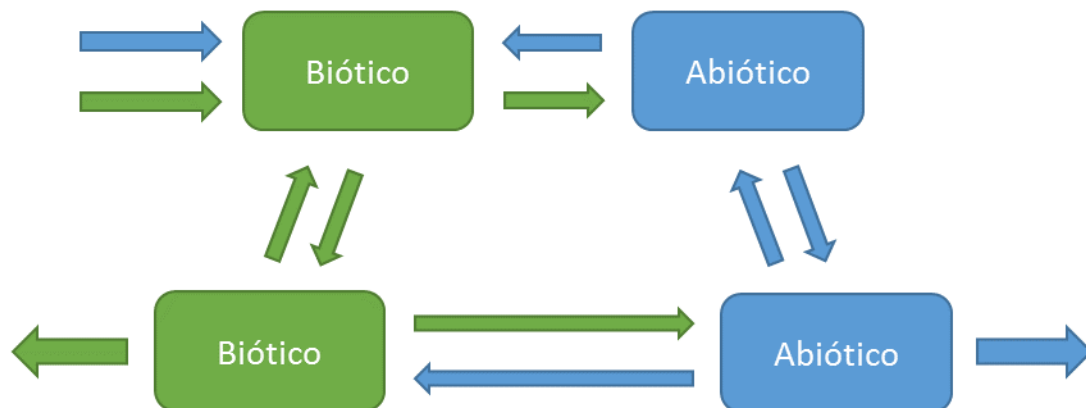


Figura 4.2. Modelo Conceptual de un Ecosistema. Se indican los componentes abióticos y bióticos, las flechas indican interacciones ecosistémicas. Fuente: Elaboración propia.

Dentro de la jerarquía ecológica los componentes abióticos reconocidos como principales en los ecosistemas lóticos se encuentran la columna de agua y los sedimentos, con sus propiedades físicas y químicas. Estos componentes también son incluidos desde otras perspectivas en las jerarquías geomorfológicas e hidrológicas.

4.1.2.2 Especies y Hábitat

Hábitat es definido típicamente como un área que contiene una combinación particular de condiciones ambientales y recursos, los que son requeridos por los individuos de una especie determinada o de un grupo de especies, para llevar a cabo los procesos de la vida (Hall et al. 1997; Morrison et al, 1998). Esta definición ha sido utilizada especialmente por especialistas de fauna. Hábitat en ecología de ríos también se ha usado ampliamente como hábitat físico, que determina las características donde pueden habitar las especies acuáticas. En la práctica la caracterización física de hábitat, se usa tanto para describir las localizaciones de organismos como de los ecosistemas.

4.1.3 Factores Ambientales Forzantes

Entre las condiciones ambientales de gran importancia en los ríos de Chile, en las zonas centro norte está el régimen del caudal y la salinidad, variables sensibles a efectos de origen antrópico, y especialmente por la fuerte regulación de esos cursos de agua, debido a la otorgación de derechos consuntivos de agua que entrega el Estado, y que afectan el caudal.

Desde el punto de vista de ecosistémico, las condiciones del hábitat son propiedades físicas y químicas de uno de los componentes estructurales de los ríos como ecosistemas.

4.1.4 Régimen del Caudal

El manejo del agua a menudo ha fallado en reconocer que, el principio científico fundamental en los sistemas de aguas corrientes depende largamente de su carácter dinámico, y así del volumen o magnitud del caudal, la calidad del agua y la integridad ecológica de los ríos (Poff et al, 1997).

Desde el punto de vista ecosistémico, el agua se puede observar como un medio donde se desarrollan los organismos y que tiene una dinámica que se expresa en el desplazamiento o caudal. Este aspecto dinámico del componente agua de los ecosistemas lóticos, está descrito como el patrón o régimen del caudal natural en el análisis de los ecosistemas (Poff et al, 1997). El “régimen del caudal natural” define y organiza los ecosistemas ribereños; en los ríos, la estructura física del ambiente, y así el hábitat (para los organismos) es definido fuertemente por procesos físicos, especialmente el movimiento del agua y los sedimentos dentro del canal y entre los canales y la planicie de inundación. Para comprender la biodiversidad, producción y sustentabilidad de los ecosistemas ríos, es necesario apreciar el rol central de organización que juega un ambiente físico, dinámicamente variable. El hábitat físico de un río incluye el tamaño de los sedimentos, canales, morfología de las planicies de inundación y otros hechos geomorfológicos (Poff et al, 1997).

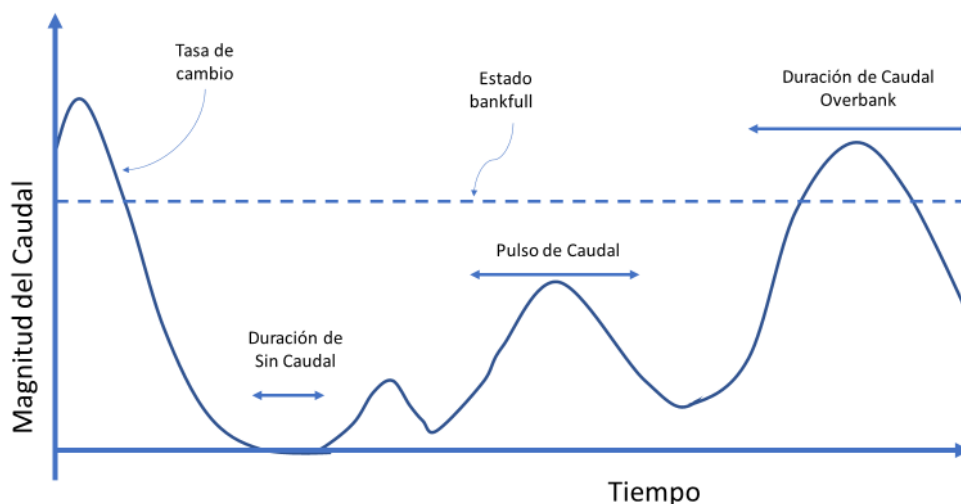


Figura 4.3. Componentes del régimen del caudal considerados ecológicamente importantes.

Fuente: modificado de Walker et al, 1995 y McGregor et al, 2011

El caudal natural de un río se puede analizar en distintas escalas de tiempo: horas, días, estaciones del año, años; y en periodos aún más largos. Se requieren muchos años de observación desde estaciones fluviométricas para poder describir los patrones característicos de caudal, secuencia, variabilidad, es decir el régimen natural del caudal (Poff, 1997). Los componentes del régimen del caudal se muestran en la Figura 4.3.

4.1.5 Salinidad

La salinización de ríos está ocurriendo en todos los continentes, como un resultado de varias actividades humanas y se espera que empeoren con el cambio climático e incrementos en la demanda de agua. El aumento antrópico en la salinización ribereña resulta en salinidades modestas (1-10 mS/cm²) comparado con los lagos salinos (100 mS/cm²). En el corto plazo, la salinización tiene como respuesta lo siguiente:

- Disminución de la biodiversidad
- Procesos ecosistémicos alterados
- Cambios en la composición
- Rasgos alterados de las comunidades.

Además, la salinización antropogénica de los ríos crea ambientes nuevos e introduce la salinidad como fuerza selectiva en sistemas dominados por el flujo del agua (caudal) (Kefford et al, 2016).

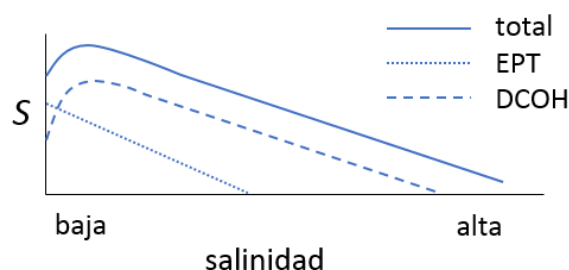


Figura 4.4. Relación la riqueza de especies de macroinvertebrados (S) y la salinidad. i) invertebrados totales; ii) EPT (Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera); iii) DCOH (Diptera, Coleoptera, Odonata y Hemiptera). Fuente: Kefford et al, 2016.

En ambientes acuáticos marinos, el uso del concepto “manejo basado en ecosistemas” está adquiriendo cada vez mayor importancia y ha tomado como base el mapeo de hábitat, ya que aportan elementos esenciales para realizar evaluaciones integradas del ecosistema (Cogan et al, 2009). Para su desarrollo se requiere de un importante paso inicial, que es caracterizar el hábitat de los ecosistemas (Baker & Harris, 2012). El análisis del fondo marino y mapas de hábitat que identifican zonas de roca madre expuesta y de depósitos superficiales de sedimentos gruesos, finos y mixtos, entregan detalles espacializados de las características del fondo marino, tales como ondas de arena, afloramientos rocosos, montículos, sectores con erosión y entregan las condiciones de línea base para los monitoreos marinos (Davis et al, 2016).

El concepto de tipos de hábitat provee una base de trabajo conveniente para mapear grandes áreas sobre la base de hechos que son fácilmente distinguibles en fotografías aéreas o imágenes satelitales. Mapas de este tipo, tienden a focalizar nuestra atención sobre los tamaños de los parches y sus arreglos.

En los estudios ambientales, habitualmente se considera el hábitat, y se usa para caracterizar el ambiente donde se desarrollan la población de una especie o las poblaciones de un grupo de especies, pero habitualmente se hace implícitamente con la idea de “tipo de hábitat”. Esto es interesante, ya que puede asociarse a la carta de ocupación de tierras (COT) que se usa como un estándar para presentar información de flora y vegetación en los EIA. Así agregando

a algunos aspectos geomorfológicos, se puede describir el ambiente de las especies localmente. Este concepto de hábitat, permite mediante los análisis basados en Sistemas de Información Geográfico, proponer áreas que presentan las características del hábitat para una especie o grupos de especies. El desarrollo de modelación espacial de la distribución de especies animales y plantas en las últimas décadas permite pronosticar los efectos antrópicos sobre la biodiversidad a diferentes escalas y puede ser una herramienta fundamental estudios del hábitat de las especies de interés (Guisan & Zimmerman, 2000; Guisan & Thuiller, 2005).

4.1.6 Escalas Espacio -Temporales

Una característica de los sistemas lóticos es su alta heterogeneidad espaciotemporal. Esta heterogeneidad se manifiesta como vías interactivas a lo largo de cuatro dimensiones (Ward, 1989). La dimensión longitudinal integra las uniones aguas arriba y aguas abajo. Los intercambios de energía y materia entre el canal y el sistema de planicies de inundación /zona ripariana ocurren a lo largo de la dimensión lateral. La dimensión vertical, tiene un componente lateral hipogeo e incorpora las interacciones entre el canal y el agua del subsuelo contigua.

En el caso de la secuencia de eventos de crecidas e inundaciones, en la dimensión temporal, define la variación estacional de los ríos y cursos de agua (Poff et al, 1997). La variación estacional, está relacionada con la predictibilidad de los eventos de inundación, y actúa como una restricción para la historia de vida de muchos organismos acuáticos.

El conocimiento existente del río Loa, desde el punto de vista ecológico, es escaso y se basa en estudios especiales realizados principalmente por interés del Gobierno Regional. No obstante, existe una serie de información hidrológica, y de calidad del agua, que se han obtenido en forma separada para el seguimiento de normativas sanitarias y ambientales.

4.2 Definición del método y desarrollo del caudal ambiental

4.2.1 Consideraciones en la definición del método

La definición del caudal ambiental de un río utilizada en la presente guía, es la misma de la “Guía metodológica para determinar el caudal ambiental para centrales hidroeléctricas en el SEIA” publicada por SEA en 2016 (SEA, 2016), y corresponde a la desarrollada en la Declaración de Brisbane en el año 2007: *“los caudales ambientales (o ecológicos) son los flujos de agua, el momento de su aplicación y la calidad de las aguas precisos para mantener los ecosistemas de agua dulce y de los estuarios, así como los medios de subsistencia y bienestar de las personas que dependen del ecosistema”*. Pero a diferencia de esa guía, en la cual se busca poder realizar una evaluación ambiental de un proyecto en concreto, la presente tiene como objetivo el poder determinar un caudal ambiental asociado al sistema en su condición original, o en un punto lo más cercano a este y que muchas veces no está dado por la actual condición del sistema. Así, determinando un escenario base desde el cual iniciar cualquier análisis de disponibilidad del recurso y condición del sistema (y de las otras partes que de él dependen), será posible realizar una evaluación igualitaria y comparable de todos los servicios ecosistémicos prestados y de las demandas externas de recursos (tanto actuales como futuras). Lo anterior posibilita el análisis de disponibilidad de recursos como la priorización de ellos, y evitar poner en riesgo los servicios y funciones críticas del ecosistema (O’Keeffe, 2012; Harwood et al., 2017).

Con lo anterior, la metodología planteada considera un primer análisis general del sistema, el cual incluye la totalidad del río y no solo un tramo o área de influencia de un proyecto cualquiera, considerándose así todas las dependencias, relaciones e interacciones existentes

entre los distintos tramos y servicios. Así, se entenderá al río como un sistema integral y continuo, en donde (en general) existe una conexión de todas sus partes por medio de sus aguas, y nunca funcionará como un conjunto (o unión) de tramos de ríos que cuentan con comportamientos y condiciones independientes entre sí. Con lo anterior, será posible generar un análisis de la potencialidad del sistema como un todo, y a su vez, de cada uno de sus subpartes (tramos), la cual sentará la base contra la cual deberá ser comparada cualquier nueva condición de los tramos debido a una intervención y/o modificación del caudal pasante.

Respecto de la evaluación y posible priorización de los servicios y usos, se debe tener en cuenta que la determinación del caudal ambiental corresponde a un proceso científico pero con componentes sociales, asociadas a los requerimientos humanos (usuarios y dependientes del recurso). Son estos últimos (o deben ser) el centro de las decisiones, y no otros intereses particulares no alineados con el bien general, por lo que podrán determinarse diferentes caudales ambientales según sean los requerimientos y prioridades de los grupos de usuarios del sistema (O’Keeffe y Le Quesne, 2009), además de que siempre se debe tener en mente que el manejo de los ríos conllevará, inevitablemente, una mezcla compleja entre compensaciones (trade-offs) y costos de oportunidad del recurso (Parker & Oates, 2016).

Esto último, a modo de ejemplo, es ejemplificado en la Nota Técnica C.1 “Water Resources and Environment – Environmental Flows: Concepts and Methods” del Banco Mundial (Davis & Hirji, 2003), mostrando una relación tipo entre el uso del recurso (ver Figura 4.5), los beneficios generales obtenidos, el riesgo asociado y el tipo de uso (sustentable o no sustentable).

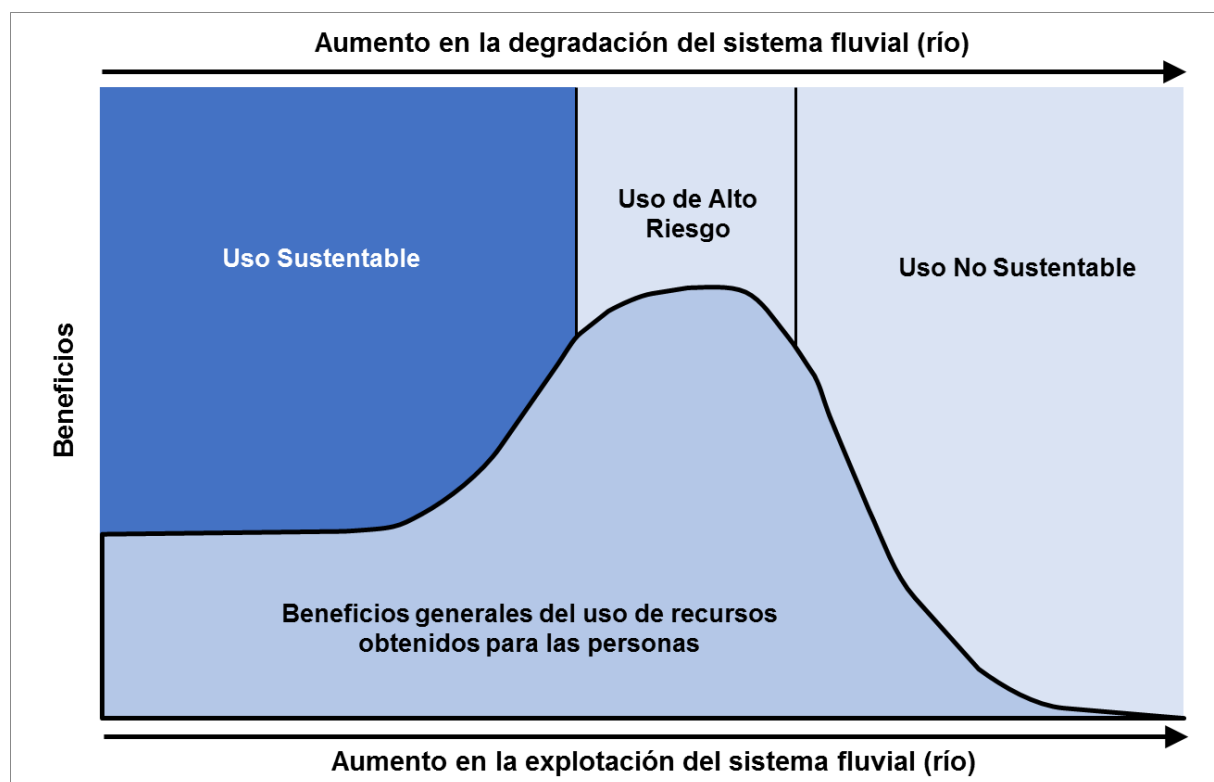


Figura 4.5. Esquema ilustrativo hipotético de la relación general que existe entre el uso del ecosistema (río y sus recursos) y la condición general de este como respuesta (Fuente: Adaptado de Davis & Hirji, 2003).

Además, los objetivos para la determinación de los caudales ambientales deberán estar alineados con las características del sistema, tanto en términos de las partes que el sistema sostiene (ecosistema que se desarrolla asociado al río) como de la hidrología del río (régimen de caudales), y no deberán establecerse objetivos que se alejen en demasía de la condición más natural del mismo, o que puedan generar cambios en los tipos de ecosistemas presentes en el río. En la Figura 4.6 se muestran ejemplos entregados en O’Keeffe & Le Quesne (2009), en donde la conceptualización hecha por él para los caudales ambientales, indican que deben estar alineados con el tipo de río y los objetivos planteados, y donde es posible observar que la serie de caudal ambiental tendrá una relación muy estrecha con el hidrograma del sistema, y donde los casos representan: a) en ríos desarrollados en áreas de conservación el énfasis debe estar en mantener tanto caudal natural como sea posible y con ello minimizar la pérdida de biodiversidad por la extracción de agua, b) en ríos con desarrollo en áreas urbanas, el objetivo debe ser simplemente mantener la calidad del agua y parte de las áreas recreacionales, pudiendo reducirse el caudal base y reducir las inundaciones, c) en ríos alimentados por manantiales el énfasis debe estar puesto en mantener un caudal base robusto (fuerte), y un aprovechamiento basado en el uso del agua de inundaciones y; d) en épocas de bajo caudal se reducirá considerablemente el caudal, y se mantendrán mayores flujos en los períodos de mayor caudal, considerando que la biodiversidad depende directamente de ellos.

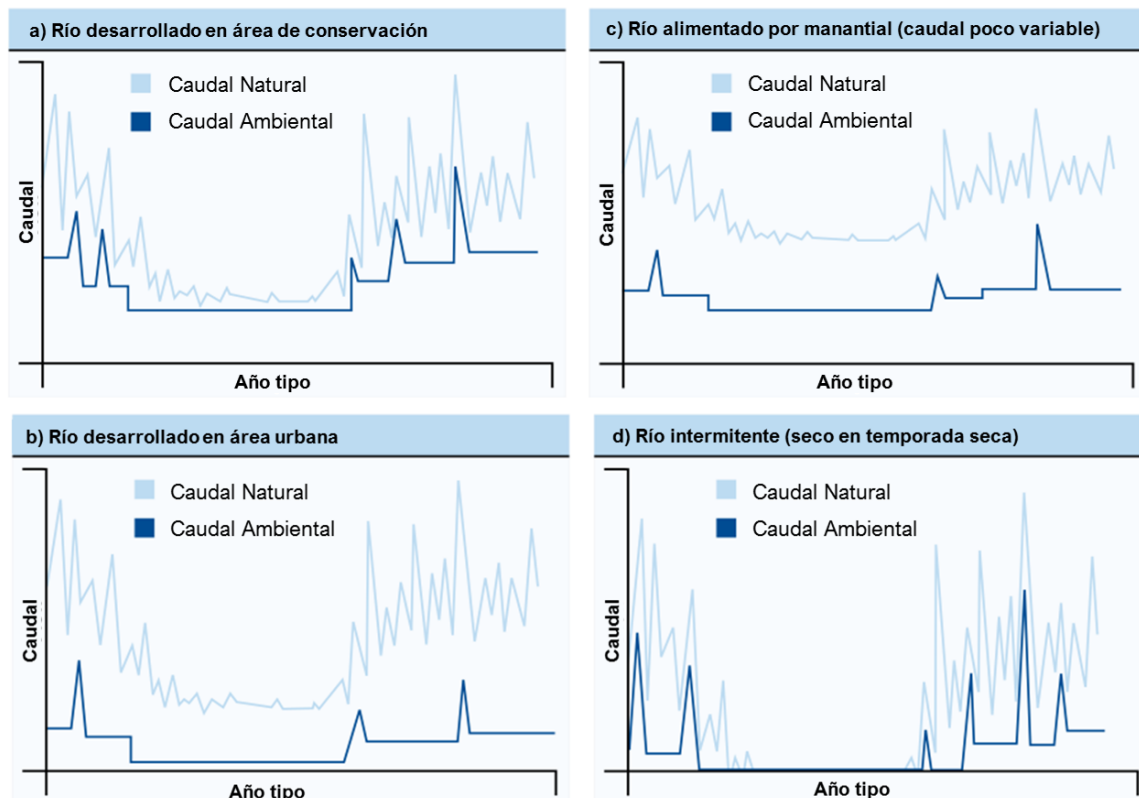


Figura 4.6. Diferentes caudales ambientales determinados según los objetivos planteados para cada tipo de río (Fuentes: Adaptado de O’Keeffe & Le Quesne, 2009).

Por lo anterior, cualquier estimación que sea realizada deberá contener de forma explícita y documentada, todos los criterios utilizados en la valoración y priorización utilizada como objetivo ambiental, ya que diferentes evaluaciones contarán con distintas relaciones entre el grado de protección deseado del sistema y la cantidad de agua a ser destinada como recurso

a explotar (diferentes objetivos ecológicos, sociales y económicos) (Davis & Hirji, 2003; O’Keeffe & Le Quesne, 2009; O’Keeffe, 2012).

De forma gráfica, el caudal ambiental puede ser entendido como la suma de componentes mostrado en la Figura 4.7, donde la primera componente corresponde al “caudal de supervivencia” y que es aquel caudal crítico mínimo que permite sostener el mínimo del sistema durante el período de sequía; la segunda correspondiente a la suma de los “requerimientos ecológicos”, que es la cantidad de agua necesaria en los períodos de bajo caudal y que están ligadas a períodos específicos de importancia ecológica (p.ej. estadio de vida específicos de la biota, desarrollo de procesos ecológicos), y los “requerimientos sociales”, correspondiente a caudales que son requeridos como parte de acciones/necesidades culturales o sociales humanas, es decir, proveer servicios ecosistémicos básicos para el desarrollo de las comunidades. La tercera componente corresponde a los eventos de alto caudal, los cuales corresponden a pulsos de mayor intensidad o a eventos de inundación del sistema, los cuales tendrán por fin la mantención del sistema (p.ej. morfología del canal) o permitir el desarrollo de respuesta/procesos ecológicos (p.ej. desove o migración de los peces). (USAID, 2017)

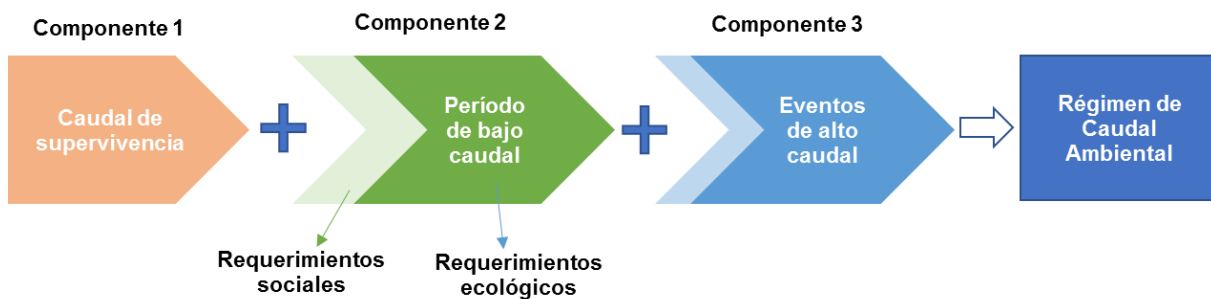


Figura 4.7. Caudales que componen el régimen de caudal ambiental (Fuente: Adaptado de USAID, 2017).

En cuanto a los sistemas a evaluar, los ríos corresponden a un tipo de humedal dentro de la clasificación de ellos, los que se definen como Humedales continentales (MMA-CEA, 2006). Dentro de la categoría de humedales continentales, los ríos se encuentran en el ecotipo “escorrentía”, y sus características dependerán de su ubicación a lo largo del país. Ellos se diferenciarán tanto en sus regímenes y origen de sus aguas, como también en las características de ellas, siendo estas últimas las promotoras de todos los servicios ecosistémicos ofrecidos por el río. Así, las características de las aguas definirán tanto la biología y biodiversidad contenida en el río (según los tipos de ecosistemas desarrollados) como también los servicios ecosistémicos posibles de ser provistos (MMA-CEA, 2007).

En cuanto a su condición de humedal, ellos pueden ser representados como ecosistemas constituidos por componentes vivos (bióticos) y no vivos (abióticos), que interactúan activamente como una **unidad ecológica**. Numerosos autores señalan que los ecosistemas pertenecen a una clase más amplia que los sistemas físicos, ya que éstos son entidades históricas, que poseen memoria de su desarrollo y de los eventos que afectan su comportamiento (SAG-CEA, 2006). Así, las características ecológicas de los ríos están definidas en gran medida por la estrecha interacción que se genera entre la morfología del cauce y el régimen de precipitaciones, las que definirán las condiciones hidrológicas e hidrodinámicas del sistema, obteniéndose múltiples configuraciones en el tiempo y espacio (Allan, 1995 en DGA-CEA, 2008).

A consecuencia de estos procesos, los ríos presentan una alta heterogeneidad espacial y temporal, las que en conjunto establecen las condiciones ambientales que modulan la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos (DGA-CEA, 2008). A modo de ejemplo, los procesos climatológicos se asocian a la macroescala, y la cual determinan y fuerzan la dinámica del ecosistema, a diferencia de las condiciones locales del escurrimiento (velocidad, alturas) que controlan los procesos de intercambio entre las diferentes matrices (agua, sedimentos y atmósfera) e influyen de manera directa en la respuesta de los componentes biológicos en las diferentes escalas (Figura 4.8) (DGA-CEA, 2008).

Lo anterior es evidenciado en el estudio “Determinación de caudales ecológicos en cuencas con fauna íctica nativa y en estado de conservación”, desarrollado por CEA para la DGA (DGA-CEA, 2008), en donde se definen Hidroecoregiones. En cada una de ellas se observa el vínculo existente entre la biología y los ecosistemas desarrollados en los ríos considerados como parte de la Hidroecoregión, no solo dependerá de las condiciones y características hidromorfológicas, sino que cuentan con una estrecha relación con las características fisicoquímicas de las aguas (calidad de aguas). Así, serán relevantes en la definición de las condiciones base, o las más naturales conocidas, variables como la salinidad, la temperatura o la presencia de materia orgánica. Además, el estudio concluye que *“es necesario realizar un análisis diferencial de ríos localizados en cuencas exorreicas a lo largo de Chile, ya que aun cuando las condiciones hidrológicas e hidrodinámicas constituyen el proceso que mantiene los ecosistemas acuáticos, se debe complementar el análisis con un balance de masa de sales (ríos zona norte), balance de masa de nutrientes (zona centro-sur) y balance térmico (zona austral)”*. Por lo anterior, es necesario realizar un análisis previo para la identificación de las variables relevantes de cada sistema, en términos de contar con evaluación de ellas como parte de las variables de estado/condición del hábitat y/o servicio ecosistémico. En el caso del río Loa que está presente en la Hidroecoregión “Loa-Camarones”, se tiene que uno de los conductores principales de la condición y biología del sistema recae en la salinidad y su distribución a lo largo del río (DGA-CEA, 2008).

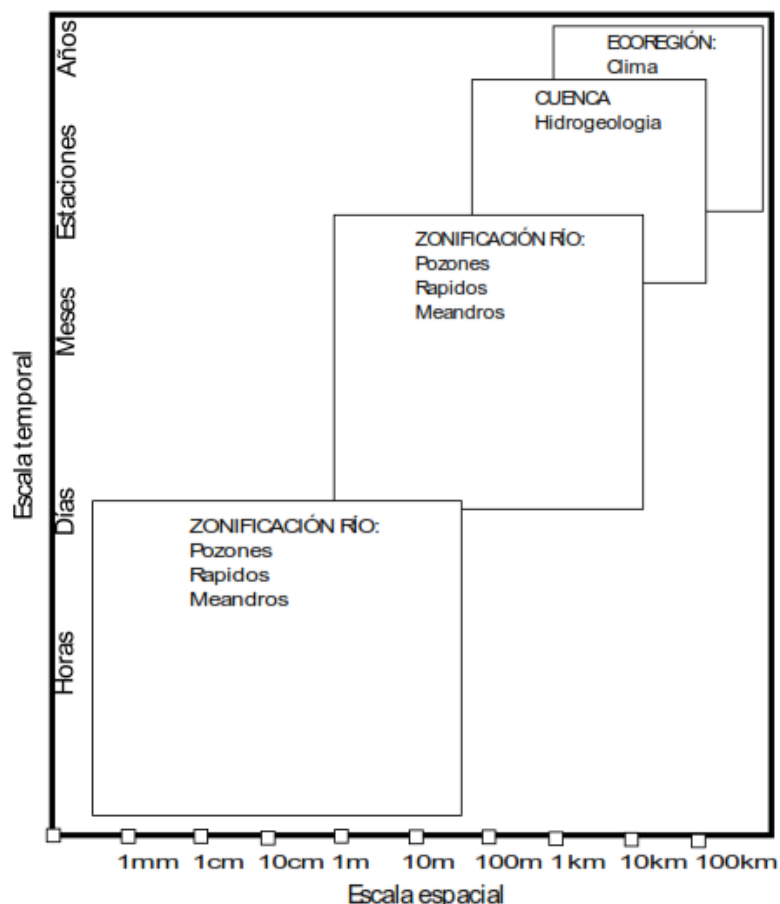


Figura 4.8. Esquema de diferentes escalas que interactúa en la dinámica espaciotemporal de ecosistemas lóticos (Fuente: DGA-CEA, 2008).

4.2.2 Desarrollo del caudal ambiental

El proceso completo para la estimación de un caudal ambiental es enmarcado como parte de una evaluación de caudales y estados ambientales del sistema, es decir, la determinación del caudal ambiental será una parte del proceso de análisis y tiene como finalidad el poder definir una condición contra la cual realizar una comparación de la condición actual, cualquier otro escenario futuro posible de ser evaluado, y determinar el posible déficit o superávit del recurso existentes en el río. Para ello, se definen los pasos requeridos para la evaluación del caudal ambiental de un sistema natural (Figura 4.9), mediante el desarrollo de 8 pasos/actividades.

Los pasos por desarrollar son los indicados en la Figura 4.9, y se detallan a continuación.

i. Recopilación/levantamiento de información para la descripción del sistema fluvial .

Se deberá incluir información relacionada con hidrología, meteorología, morfología, biota y biología, fisicoquímica del agua, servicios ecosistémicos, usos antropogénicos del río, derechos de agua, y desarrollo de proyectos en base al río. Además de la información posible de ser obtenida desde registros bibliográficos y fuentes escritas, es necesario el levantamiento de información y conocimiento no escrito con que cuentan las comunidades y habitantes del lugar, la cual pueda entregar antecedentes sobre las condiciones históricas (anteriores) del

sistema y de los usos dados al río. Esto último, permitirá contar con información específica sobre los ecosistemas existentes en el pasado.

ii. Definición de variables relevantes del sistema y determinación de la condición no alterada o “natural” del sistema .

Se analizará la información hidrológica disponible junto con la información de derechos de aprovechamiento existentes, con lo cual se construirá la hidrología del sistema sin extracciones. En el caso de las extracciones de agua históricas, las que estén asociadas tanto al desarrollo de actividades ancestrales por parte de la comunidad como también aquellas asociadas al consumo de agua, se deberán analizar para su inclusión como parte de la condición “natural” del río, por deberse a servicios (y derechos) prestados (servidos) por las aguas del río de forma histórica y ancestral. En cuanto a las funciones de cambio de otras variables, se deberá conceptualizar (al menos de forma aproximada) cuales son las funciones de cambio de la(s) variable(s) relevantes a lo largo del río, y con lo cual poder establecer una banda (rango) de sus valores en el río bajo la condición “natural”.

iii. Análisis de la biota y servicios ecosistémicos del sistema .

Se desarrollarán curvas de habitabilidad teóricas para la biota posible de existir a lo largo del sistema. Junto con ellas, se construirán curvas de desarrollo de los servicios ecosistémicos identificados como con posibilidad de desarrollo.

iv. Definición de ecosistemas potenciales en condición “natural” y actual .

Se construirá un modelo del río en toda su extensión para la condición “natural”, mediante el cálculo de las condiciones hidráulicas en cada tramo (p.ej. caudal pasante, y altura y velocidad media asociada) y la estimación de las otras variables relevantes. Con el modelo del río y sus características, se definirán los ecosistemas posibles de ser desarrollados a lo largo del río.

Junto con lo anterior, se deberá realizar una evaluación de las curvas de habitabilidad y de desarrollo de servicios ecosistémicos en el sistema, con lo cual verificar y validar la anterior definición de los ecosistemas.

En cuanto a las áreas de análisis, y a diferencia de la Guía del SEA (2016) en donde se define áreas de importancia basadas en la ecología o por ser relevantes a nivel antrópico (AIA: áreas de importancia ambiental), en la presente metodología el foco está puesto en el desarrollo de todos los ecosistemas del sistema. Es en estos ecosistemas en donde se desarrollan tanto la biota como los servicios ecosistémicos, por lo que la diferencia principal radica en que, para la evaluación del caudal ambiental del río es necesaria la evaluación de todos sus ecosistemas.

v. Evaluación del estado de hábitat y servicios ecosistémicos en condición “natural”, definición del criterio y estimación del régimen del caudal ambiental .

Utilizando como base la hidrología de la condición “natural” antes desarrollada, se evaluará la condición de hábitat potencial y condición de los servicios ecosistémicos por cada ecosistema definido. Por otra parte, para la estimación de un caudal ambiental se hace necesario establecer un criterio para la mantención de las condiciones del hábitat y de los servicios del río, y el cual deberá resguardar la integridad ecológica y biodiversidad en los ecosistemas, junto con asegurar de la mejor forma posible el desarrollo de los servicios ecosistémicos más relevantes. Cabe recordar que en la estimación de la condición “natural” debieran haber sido incluidos los servicios más básicos de provisión de agua para actividades ancestrales de la

comunidad y para agua de consumo, con lo que esos servicios contarían con una condición idónea bajo el régimen de caudal ambiental.

- vi. Configuración actual del sistema y definición de escenarios futuros de la disponibilidad de agua para la evaluación .

Se deberá construir el esquema actual de extracción de aguas desde el sistema, y con el cual desarrollar la hidrología actual. Además, para la condición futura, se deberán definir los escenarios a desarrollar y las consideraciones tras ellos. A modo de ejemplo, podrá desarrollarse la hidrología futura asociada a los escenarios de cambio climático propuestos por el IPCC (2014).

- vii. Evaluación de la condición actual y futura, considerando escenarios futuros de disponibilidad de agua. Comparación mediante valoración de la presencia de la biota y del desarrollo de los servicios ecosistémicos de escenarios respecto del caudal ambiental definido.

En los pasos anteriores ya se habrá definido la hidrología para la condición “natural” y actual, junto con la determinación del régimen del caudal ambiental. Además, se ha estimado la disponibilidad de agua futura por medio de la definición de escenarios a evaluar. Con lo anterior se realizará la evaluación de las condiciones de hábitat y de los servicios ecosistémicos para la condición actual y futura, y las cuales serán comparadas contra la condición dada por el caudal ambiental estimado. Todos los resultados obtenidos corresponderán a los porcentajes de hábitat y condición de los servicios alcanzados en los diferentes ecosistemas y para cada uno de los escenarios.

Los resultados obtenidos para la condición actual y escenarios futuros, serán contrastados respecto de los resultados establecidos por la condición de caudal ambiental. Este contraste permitirá evidenciar la condición actual del río y la disponibilidad de recursos en el futuro.

- viii. Optimización y mejora en el uso del recurso según la priorización de los servicios ecosistémicos, realizada en base al criterio y objetivo establecido por parte de usuarios y actores relevantes.

Se plantea la necesidad de realizar una optimización y mejora en el uso de los recursos según el criterio y necesidades a satisfacer de los usuarios y actores asociados al sistema, la cual dependerá del recurso disponible y de la planificación futura de necesidades. Así, todo dependerá en primer lugar de los resultados obtenidos de la comparación de la condición actual respecto del caudal ambiental, y en segunda instancia, de la situación futura proyectada. Así, la condición actual puede contar con una condición superior (mejor) a la de caudal ambiental, lo que permitiría la existencia de nuevos usos y extracciones desde el sistema (en escenarios futuros); y por el contrario, una condición deteriorada respecto de la establecida por el caudal ambiental, conllevará la necesidad de gestión y mejora del sistema por medio de la reposición de aguas y otras medidas de reparación, sin dejar espacio a nuevas extracciones.

Evaluación del Caudal Ambiental



Figura 4.9. Pasos y actividades definidas para la definición y evaluación de un caudal ambiental (Fuente: Elaboración propia).

4.3 Definición de ecosistemas potenciales

4.3.1 Uso del Agua y Ecosistemas

El agua, como recurso para la sociedad humana se trata en función de su uso. En la regulación ambiental chilena, el uso no consuntivo ha sido objeto de análisis ambientales, dado la importancia de la generación hidroeléctrica como parte de la matriz energética del país.

En esta guía se considera en forma especial, la importancia del uso consuntivo del agua de ríos y de cursos de agua no permanentes, así como de un amplio tipo de ecosistemas asociados denominados humedales. La guía está orientada especialmente a los cursos de agua permanentes y que en la limnología clásica se denominan sistemas lóticos (Figura 4.10). En este contexto se analiza como el uso del agua como recurso determina el funcionamiento de los ríos como ecosistemas y así la biodiversidad de estos sistemas naturales.

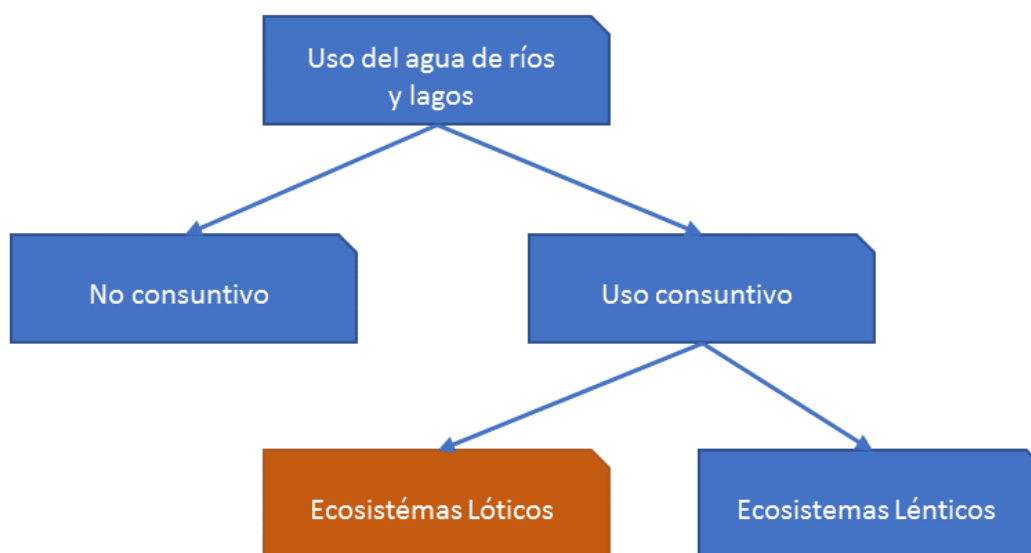


Figura 4.10. Uso del agua en ecosistemas (Fuente: Elaboración propia).

El agua es ampliamente considerada como el recurso natural más esencial, aun así los sistemas de agua dulce están entre los más amenazados directamente por las actividades humanas. Los sistemas acuáticos son transformados, a través de diversos cambios, como los diferentes usos de la tierra, urbanización, industrialización u obras de ingeniería como represas, irrigación, y transferencia entre cuencas, entre otros, que maximizan el acceso humano al agua. Los beneficios de la provisión de agua a la productividad económica son a menudo acompañados por afectaciones a los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad con costos económicos potenciales no cuantificados. Para asegurar la sostenibilidad de la entrega de agua y proteger la biodiversidad acuática, se requiere implementar acciones concretas para controlar las amenazas primarias en un rango de escalas espaciales desde la global a la local. El éxito de las estrategias de manejo integrado del agua depende de un balance entre uso del recurso usado y la protección de ecosistemas (Vörösmarty et al 2010).

4.3.2 Ecosistemas naturales, híbridos y nuevos

En general, desde la perspectiva del paisaje, es necesario considerar la complejidad de los ecosistemas y no dividir el ambiente en categorías dicotómicas natural/no-natural,

producción/conservación, intacto/degradado (Hobbs et al 2014). Los paisajes se caracterizan cada vez más, por un complejo mosaico de ecosistemas o “parches” en variados estados de modificación donde cada uno, entrega varias combinaciones de servicios ecosistémicos y presenta diversas oportunidades para su manejo. Estos parches interactúan y afectan procesos en amplias escalas (tales como el caudal de agua o las migraciones animales), y necesitan del desarrollo urgente de una estrategia de restauración y conservación que reconozca estos acoplamientos espaciales (Hobbs et al 2014). Desde una perspectiva de conservación de la biodiversidad, un paisaje consiste típicamente de múltiples ecosistemas o parches con características primarias y funciones distintivas (Kueffer & Kaiser-Bunbury, 2014).

Paisajes típicos encontrados en áreas periurbanas en todo el mundo, incluye ecosistemas en varios estados de desarrollo ecológico, dentro de áreas destinadas para uso urbano, áreas de producción, dando como resultado un arreglo de ecosistemas modificados de distintas extensiones, que podríamos distinguirlos en un gradiente de estado de desarrollo, como de carácter histórico, híbrido y nuevos (Hobbs et al 2014).

Los ecosistemas nuevos (también denominados ecosistemas emergentes) tienen una composición de especies y abundancias relativas que no han ocurrido previamente dentro de un bioma dado. Las características claves son i) novedad: nueva combinación de especies, con potencial para cambios en el funcionamiento ecosistémico; ii) agenciamiento humano: ecosistemas que son el resultado de intervenciones humanas deliberadas o acciones humanas inadvertidas, pero que no dependen de la intervención humana continua para su mantención. Tales ecosistemas resultan de la respuesta biótica a condiciones abióticas inducidas por el hombre y/o a elementos bióticos nuevos (por ejemplo degradación de la tierra, enriquecimiento de la fertilidad del suelo, introducción de especies invasoras). Esto incluye la cesación del manejo del sistema que ha sido manejado o creado por los humanos (por ejemplo, agroforestería, tierras de pastoreo). Actualmente en todo el mundo, se originan nuevas combinaciones de especies, frecuentemente en condiciones de fuerte impacto humano directo e indirecto (Hobbs et al 2006). Los ecosistemas naturales, han sido una idea básica en ecología de ríos y constituyen un paradigma para la comparación de los cambios para evaluar los cambios en los ecosistemas acuáticos.

4.3.3 Ecosistemas, Estabilidad y Resiliencia

La humanidad influye fuertemente los procesos biogeoquímicos, hidrológicos, y ecológicos desde la escala local a la global. Enfrentamos cada vez más ambientes variables con incrementos en la incertidumbre acerca de cómo los ecosistemas responderán a un aumento inevitable en los niveles de uso humano. Al mismo tiempo, planteamos el desafío de mantener estados ecológicos deseados en los ecosistemas, en un escenario de aumento del nivel de perturbaciones (Folke et al 2004).

La combinación de estas dos tendencias llama a un cambio desde el paradigma de “*comando y control*” para una producción óptima estabilizada, a una basada sobre el “*manejo de la resiliencia en ambientes inciertos*” o cambiantes, para asegurar servicios ecosistémicos esenciales (Holling & Meffe, 1996, Ludwig et al 2001). La resiliencia de un ecosistema está definida, como la magnitud de la perturbación que un sistema puede experimentar, antes de que este derive en un estado diferente (dominio de estabilidad) con diferentes controles sobre la estructura y funcionamiento, y distingue la resiliencia de los ecosistemas de la resiliencia en ingeniería (Holling, 1973). En el contexto de esta guía, se define resiliencia como la capacidad de un sistema para absorber perturbaciones y reorganizarse, mientras experimenta cambios de manera que retiene esencialmente la misma estructura, función, identidad y

retroalimentaciones (Walker et al 2004). La habilidad para reorganizar y renovar el estado deseado de un ecosistema, después de una perturbación y cambio, dependerá fuertemente de los estados y dinámicas en las escalas espaciotemporales superiores e inferiores (Peterson et al 1998). La manera antigua de pensamiento implícitamente asume un ambiente *estable e infinitamente resiliente*, en un estado estacionario global. La nueva perspectiva reconoce que la resiliencia puede ser y ha sido erosionada, y que la capacidad de auto reparación de los ecosistemas, no debe ser tomada como garantizada (Folke, 2003, Gunderson 2000). El desafío de esta nueva situación es destacar activamente la capacidad de los ecosistemas para soportar el desarrollo económico y social. Esto implica tratar de sostener rutas o vías deseables y estados de los ecosistemas frente a cambios continuos (Folke et al. 2002, Gunderson & Holling 2002, Folke et al 2004). La resiliencia refleja el grado para el cual un sistema adaptativo complejo es capaz de autoorganizarse (versus la falta de organización u organización forzada por factores externos) y el grado para el cual el sistema puede ser construido e incrementar la capacidad de aprendizaje y adaptación (Folke et al 2004).

4.3.3.1 Estado Único

En ecología, el equilibrio o estado estacionario, y su metáfora asociada “el balance de la naturaleza”, es un antiguo concepto humano, pero sus fundamentos modernos fueron derivados de la teoría de sistemas en los años 60 (del siglo pasado). Esta fundada sobre el supuesto que los ecosistemas son altamente auto-regulados por procesos bióticos internos, incluyendo la competencia interespecífica y las interacciones planta-animal, que restringen sus dinámicas a un único estado estable (Wu and Loucks, 1995).

Se asume que este estado retornará a su condición de pre-perturbación después que la perturbación ha cesado. Un buen ejemplo respuesta que es predecible y direccional, por ejemplo, en la sucesión de plantas que pasa por estados secuenciales previsibles un punto de equilibrio simple o estado estable, (Pickett & Osfeld, 1995).

4.3.3.2 Estados Múltiples

Pero el paradigma de los ecosistemas, descrito en el acápite anterior, ha sido desafiado en las décadas recientes desde el campo de: i) la teoría de metapoblaciones y dispersión de las especies (Hanski, 1999) y; ii) el rol de la heterogeneidad espacial sobre los procesos ecológicos y la importancia de los flujos en el paisaje entre ecosistemas (Pickett & Cadenasso, 1995). Ahora los ecosistemas son vistos como inestables, abiertos, jerárquicos y escalados (O'Neill, 2001).

Inicialmente, el concepto de “resiliencia” da cuenta de la variabilidad en un sistema en un estado-estable, como una respuesta a pequeñas perturbaciones. El concepto de resiliencia da cuenta de la variabilidad en términos de tiempo de retorno a un estado estable (Pimm, 1984), y sugiere que hay un nivel máximo de perturbaciones que podría ser tolerado, sin alteraciones significativas de las funciones (Holling, 1973). Recientemente, como una respuesta a los repetidos fracasos en los esfuerzos de restauración de ecosistema perturbados, se ha establecido la condición de irreversibilidad a diversos cambios inducidos en ecosistemas naturales. En este contexto, Scheffer (2001) propuso el concepto de estados estables alternativos.

En respuesta a estos cambios irreversibles en las propiedades de los ecosistemas naturales. Múltiples estados estables pueden persistir en un único ecosistema. Esta teoría identifica cambios de los ecosistemas por vías no-lineales, basadas en la teoría de sistemas caóticos.

Los ecosistemas no son capaces de retornar a su estado original aun cuando se restauren las condiciones ambientales previas, prístinas o no (Dufour & Pieagy, 2009).

4.3.4 Concepto de Referencia Ecológica

Un desafío permanente para la conservación de la biodiversidad en ríos es conocer las “condiciones o estados de referencia de estos ecosistemas”, debido al gran dinamismo, generado por el desplazamiento del agua y los cambios en sus características físicas, químicas y biológicas a lo largo de su eje longitudinal, así como también por cambios en el nivel de caudal.

Diversas organizaciones de investigación en Estados Unidos, Europa y Australia han desarrollado programas de biomonitoreo, utilizando alguna forma de condición de referencia ecológica para identificar, aproximadamente, las potenciales diferencias asociadas con la perturbación humana (Stoddard et al 2006). Para otros autores, las condiciones de referencia simplemente reflejan el estado actual de ese sistema, sin ajustar a condiciones que percibimos como no óptimas (Kershner, 2004).

Condición de referencia ha sido definida como “un estado en el presente o en el pasado, con baja presión de origen antrópico, sin los efectos de una industrialización mayor, urbanización o intensificación de la agricultura, y solamente con modificaciones menores en las características fisicoquímicas, hidromorfológicas y biología” (Baattrup - Pedersen et al, 2008). También se han definido como “condiciones físicas, químicas o biológicas que pueden ser esperadas en los cursos de agua y ríos, con ninguna o mínima influencia antrópica” (McDowell et al, 2013). Sin embargo, el establecimiento de las condiciones de referencia, a través de la selección de “sitios de referencia”, es problemática ya que existen muy pocas cuencas que estén mínimamente afectadas por las actividades humanas. Las condiciones de referencia también consideran aspectos físicos del hábitat, necesarias para mantener su integridad y a las comunidades biológicas. Debido a que su medición es más fácil, una gran cantidad de trabajos han definido condiciones de referencia para los factores químicos y físicos, usados como subrogantes o en adición, a los indicadores biológicos (McDowell et al, 2013).

Una de las principales dificultades para establecer los ecosistemas de referencia o condición de referencia, es la falta de antecedentes específicos que permitan caracterizarlos como estados no perturbados o a ecosistemas naturales. Además, en el caso de los ríos, es evidente que los ecosistemas cambian en la medida que se avanza desde la cabecera de los cursos de agua hasta su desembocadura. La hipótesis clásica que refleja esta idea, es la del río continuo (Vannote, 1980), donde el caudal de los ríos es considerado como la variable estructurante de los ecosistemas acuáticos, dando origen a la hipótesis del caudal natural. No obstante, es reconocido que los ríos presentan una larga historia de intervención humana (Voromarsky, 2010). En Chile no hay una documentación que permita afirmar, o al menos aceptar, los sitios de referencia de los ríos para condiciones anteriores a las observaciones recientes.

4.3.4.1 Concepto de Referencia de la Directiva del Agua.

La WFD (Water Framework Directive) o Directiva del Agua, define la condición de referencia para un sistema ecológico: “como con las condiciones que prevalecen en ausencia o cerca de la ausencia de perturbaciones humanas”. Esto corresponde a características hidromorfológicas, fisicoquímicas y biológicas de una condición “no perturbada”, las concentraciones de contaminantes son cercanas a cero, y los niveles de contaminantes no sintéticos y sintéticos están bajo el nivel “ruido de fondo” (Boleau et al, 2015).

Así, la WFD parece haber sido fuertemente inspirada en una visión de la naturaleza “a priori”, centrada alrededor de las especies (Clement, 1905; Elton, 1930; Tansley 1935). Bajo este paradigma, cada unidad ecológica es considerada relativamente *constante* frente a la variabilidad ambiental y que además es capaz de autorregularse, de forma similar a un organismo (el concepto de “balance de la naturaleza”). Los ecosistemas naturales se mueven a través de una serie de fases, para alcanzar un estado clímax, donde ellos permanecen hasta que haya cambios mayores en el ambiente global, en una escala temporal mayor. Los ecosistemas serían predecibles, donde las perturbaciones serían para integrales de su dinámica, posterior a eventos de perturbaciones, los ecosistemas retornan a su estado previo “óptimo”. Los ecólogos Odum (1953) y Whittaker (1975) popularizaron este concepto y esto es asociado a una visión holística de los ecosistemas. El concepto de “condición de referencia” es aterrizado en la idea de “estado estable”.

En general, los aspectos que se consideran en los estudios de las condiciones de referencia son: ecológico, térmico, hidrológico, geomórfico y químico (Hawkins et al 2010).

4.3.4.2 Condiciones de referencia y restauración

La ecología de la restauración, utiliza como concepto base el establecimiento de una condición de referencia, a partir de una representación definida de la naturaleza, la que guía todos los aspectos de planificación e implementación de la restauración. Esta representación es lo que se denomina “referencia ecológica”, entre otros aspectos incluye la composición de especies, estructura de la comunidad, condiciones físicas del ambiente abiótico, intercambio de organismos y materiales que ocurren en el paisaje vecino, y las influencias con ecosistemas semiculturales.

Esa información biofísica nos permite reiniciar o acelerar procesos ecológicos que han sido detenidos o retardados. La referencia ecológica puede tomar muchas formas, y puede ser preparada desde fuentes de información primaria, secundaria o ambas; donde la información primaria proviene de ecosistemas actuales, denominados “sitio de referencia”. Las fuentes secundarias consisten en cualquier otra información que contribuya de alguna manera, a la descripción de un ecosistema antes de su modificación (Clewel & Aronson, 2013).

4.3.5 Criterios para la definición de condiciones de referencia

A continuación se señalan los principales criterios que deberían ser incorporados para la definición de condiciones de referencia.

4.3.5.1 Caudal Ambiental

Los cursos de agua y ríos se encuentran entre los ecosistemas más altamente alterados en todo el planeta. Aquellos ecosistemas presentes en climas mediterráneos y áridos tienen especialmente un alto grado de alteración, debido principalmente a que muchos de los cursos de agua se encuentran represados y desviados para proveer agua para el uso humano (Moyle, 2013).

Se ha reconocido que el régimen hidrológico o del caudal, juega un rol primario en determinar los hábitats físicos, los que a su vez determinan la composición biótica y sostienen la producción y sustentabilidad de los ecosistemas acuáticos (European Union, 2015).

Se denomina caudal ambiental a “la cantidad, calidad y secuencia del caudal requerido para sostener los ecosistemas de agua dulce y estuarinos, y los servicios que ellos proveen a las personas” (Brisbane Declaration, <http://www.eflownet.org>). Inicialmente, la definición de caudal

ambiental se fundamentó en la necesidad de un caudal mínimo, ya que este se consideraba el factor limitante para mantener un ecosistema ribereño saludable (Acreman & Dunbar, 2004).

En muchos casos, y como en los ríos del norte de Chile, en lugar de tener registros de los verdaderos “caudales naturales” de los sistemas, se utiliza una línea base producida por modelos hidrológicos, donde se retiran los efectos de las mayores descargas, desvíos y extracción de agua de las series registradas en la condición alterada (Acreman et al. 2014). Este “caudal naturalizado” sirve como “condición de referencia” en los estudios de línea base.

El manejo de los recursos de agua, incluyendo infraestructura como son las represas, es visto como esencial para aliviar la pobreza, mitigar el riesgo de inundación, la generación de hidroelectricidad y proveer de agua a las ciudades. Así, la regulación necesaria para el desarrollo de las actividades humanas debe ser aceptado como un cambio del régimen de caudal, el cual es inevitable, y con lo cual las condiciones típicamente naturales no pueden ser reinstaladas, (Acreman et al 2014).

Sin embargo, actualmente se reconoce que todos los elementos del régimen del caudal - incluyendo caudales bajos y nulos, y las inundaciones- juegan un rol determinante en la biodiversidad y funciones de los ecosistemas dulceacuícolas (Bunn & Arthington 2002). Así también, se debe tener en cuenta que caudales elevados en un momento inesperado del año o de la estacionalidad, pueden ser tan negativos como los caudales reducidos (pequeños) (Acreman et al 2014).

Los caudales ambientales pueden ser definidos de varias formas distintas, la mayoría de las cuales están basadas en: i) alteraciones limitadas desde la línea base del caudal natural para mantener la integridad ecológica y la biodiversidad; ii) diseño de regímenes de caudal para alcanzar resultados ecológicos específicos y servicios ecosistémicos. Los autores argumentan que las antiguas prácticas (primera forma anterior) son más aplicables a ríos naturales y seminaturales, donde el objetivo primario y la oportunidad es la conservación ecológica. La segunda aproximación de diseño, sería más apropiada para la modificación y manejo de ríos donde el retorno a las condiciones naturales no sería posible, y el objetivo es poder maximizar el capital natural tanto como sostener el crecimiento económico, recreación, o historia cultural. Con ello, esto permite tener elementos de ecosistemas, diseño y adaptación al cambio ambiental. El futuro, caracterizado por climas alterados y una intensa regulación, y donde los ecosistemas acuáticos híbridos y nuevos predominan, la aproximación de diseño puede ser la única opción posible. Esta conclusión se levanta desde la falta de ecosistemas naturales desde las cuales dibujar analogías, junto con la necesidad de amplios beneficios socioeconómicos y configuraciones valoradas de capital social y natural (Acreman et al 2014).

4.3.5.1.1 Paradigma del régimen del caudal natural

Considerando el sistema natural como punto de partida, el paradigma del régimen de caudal natural (Poff et al 1997) define que “la característica de la dinámica natural del régimen del caudal de un río -descrito por seis componentes: magnitud, frecuencia de duración, secuencia, tasa de cambio y variabilidad global de los caudales- es central para mantener la integridad y biodiversidad de los ecosistemas. Este paradigma sostiene que los organismos se adaptaron bajo el régimen del caudal natural y se conformaron las comunidades, las que ahora son mantenidas por el mismo (Lytle & Poff, 2004; Richter et al. 1997; Arthington et al. 2006).

El régimen de caudal natural será definido de mejor manera por medio de los registros históricos de caudal que anteceden al desarrollo. Algunos países, como los Estados Unidos, cuentan con registros que inician en 1900. En Chile, son pocos los ríos que presentan este

nivel de registros, y muchos registros tienen menos de un siglo. Es por ello que en lugar de verdaderos caudales naturales (basados en registros de la condición no alterada), frecuentemente se usan caudales naturalizados como línea base del sistema, generados por medio de modelos hidrológicos en los que los efectos de la extracción y descarga de agua son eliminados. Además, los impactos en el paisaje o el uso de la tierra, a menudo no son incluidos. La idea de línea base hidrológica natural es explícita en la base de trabajo sobre límites ecológicos de la alteración hidrológica (ELOHA) (Poff et al 2010). Así, los escenarios de caudal (registrados, modelados o hipotetizados) pueden ser comparados con esta condición de línea base. Finalmente, se debe indicar que aun cuando existan estaciones de registro de caudal, las descargas a cuerpos de agua raramente son medidas dentro de una precisión de menos del 10% (especialmente en los caudales altos y bajos) y los caudales modelados pueden ser lejos más inciertos, por lo que la evaluación de las diferencias en los regímenes de caudal entre escenarios naturalizados y regulados, debe reconocer estas fuentes de incerteza.

4.3.5.1.2 Paradigma del Diseño del Caudal

En ríos perturbados por humanos, el concepto de diseño del caudal es un paradigma emergente para enfrentar los desafíos de manejo de “caudales ambientales”. En la actualidad existe amplia dependencia sobre los ríos para producir hidroelectricidad, derivar y almacenar agua para diversos usos consuntivos. La aproximación de régimen del caudal natural es solamente posible para aquellos ecosistemas menos regulados.

Desde una perspectiva más holística de manejo del agua, el concepto de diseño del caudal trata de definir condiciones hidrológicas (las que pueden desviarse de las condiciones de caudal natural) que promueven procesos ecosistémicos claves o resultados biológicos de interés, mientras nos enfrentamos a un aumento de las demandas de agua por razones societales competitivas.

Aun cuando la extracción, derivación y acumulación del caudal natural de los ríos, constituyen una amenaza para la diversidad, ellas también proveen una oportunidad para diseñar caudales que permiten sostener objetivos de conservación (Chen & Olden, 2017).

Tabla 1. Roles esenciales de diferentes aproximaciones a los caudales ambientales (Acreman, 2014).

Características que definen al sistema	Paradigma del Régimen del Caudal Natural	Paradigma del Diseño del Caudal
Conductores principales de la definición del caudal ambiental	Áreas Protegidas y régimen del caudal cerca del natural	Ríos con altas demandas competitivas de agua, sistemas ribereños sobre asignadas, regímenes de caudal severamente alterados; morfología y ecología altamente modificada, ecosistemas híbridos y nuevos.
Tipo de desarrollo de recursos hídricos	Ríos no regulados, o aquellos con extracción directa menor o pequeñas represas	Ríos con cambios del régimen del caudal mayores debido a la operación de represas, extracción y desviación de agua

Características que definen al sistema	Paradigma del Régimen del Caudal Natural	Paradigma del Diseño del Caudal
Objetivos de ecosistemas	Conservación de los ecosistemas naturales o cerca de la naturalidad y la mantención de la seguridad ecológica	Múltiples valores o beneficios, crecimiento económico, seguridad alimentaria, energía, ecosistemas o paisajes modificados moderada o altamente modificados
Objetivos de Caudal ambiental	Objetivos de régimen del caudal natural y ecosistemas	Objetivos de diseño de régimen del caudal y de los ecosistemas
Implementación	Largo plazo, fundición-trasera, evaluación estadística de régimen del caudal, monitoreo, y manejo adaptativo de las asignaciones de caudal	Manejo día a día del nuevo régimen caudal diseñado, monitoreo, y manejo adaptativo de asignaciones de flujo.
Manejo de sequía	Incluye sequedad y bajos flujos como parte de régimen del caudal natural y de procesos ecológicos	Provee caudal adicional durante largos periodos de sequía para mantener las especies objetivos y servicios ecosistémicos
Manejo de pulsos de inundación	Asegurar procesos de sedimentación natural y cambios del paisaje	Asegura conectividad de los ríos y planicies de inundación.
Metas ambientales	Procesos ecológicos, especies, comunidades y ecosistema total	Metas de hábitats, especies o bienes y servicios ecosistémicos
Aproximación de manejo	Produce planes de repartición agua, establece límites de abstracción o desvíos, conserva ecosistemas auto-manejados	Define límites para el desvío, prescribe descargas de represas, permite manejo activo de agua activo y venta de agua.

4.3.5.2 Componentes Biológicos

Una de las aproximaciones comunes para describir las condiciones de referencia es cuantificar las condiciones biológicas, en un conjunto de sitios que presenten, cada uno de ellos, las mínimas o menores condiciones de perturbación (sensu Stoddard et al 2006). Varios grupos de organismos como peces, macroinvertebrados bentónicos, diatomeas bentónicas y macrófitas, que son componentes bióticos de los ecosistemas, se incluyen como descriptores de las “condiciones de referencia”, basados principalmente en la presencia y abundancia de las especies de esos organismos. Se debe recordar que la aproximación de “condición de referencia”, en su forma más simple, es una comparación entre una condición observada con una condición esperada (Armanini et al, 2013).

Los peces han sido utilizados desde hace mucho tiempo como organismos de gran importancia para determinar el estado en los ríos, sobre la base de que forman parte fundamental de la malla trófica, como depredadores superiores o bien como peces herbívoros y con múltiples interacciones tróficas con otros grupos de organismos. Los macroinvertebrados bentónicos también han sido utilizados hace varias décadas, como un grupo de organismos que permite evaluar el estado de los ecosistemas ribereños. Ha sido precisamente el estudio de esta fauna, la que ha mostrado la importancia del régimen del caudal natural, como una propiedad central en el funcionamiento ecosistémico (Poff et al, 1997). Los macroinvertebrados se ha incorporado ampliamente, y a veces han reemplazado, a los análisis químicos como criterio de decisión para considerar o no un sitio expuesto a estresores (Bailey et al, 1998). Las macrófitas y el fitobentos son componentes de los ecosistemas (denominados elementos de calidad biológica en WFD) que permiten la evaluación de estado ecológico en sistemas de agua dulce (Kelly et al, 2008).

5 METODOLOGÍAS PARA ESTIMAR EL CAUDAL AMBIENTAL

Como fue mencionado anteriormente, varias de las etapas y actividades planteadas en la presente guía como parte del desarrollo del análisis de caudal ambiental, son similares a las etapas definidas en el Guía del SEA (2016), lo cual es esperado ya que ambas guías buscan desarrollar un método para la determinación y evaluación de caudales, pero difieren en las bases desarrollo y finalidad de la estimación. En la Tabla 5-1 se comparan ambas guías en términos de diferentes variables o consideraciones en su aplicación

Tabla 5-1. Comparación de puntos base del análisis para el desarrollo de una guía metodológica / Guía SEA para centrales hidroeléctricas (SEA, 2016) y presente desarrollo.

Consideración o variable base de comparación	Guía SEA para determinación del caudal ambiental en proyectos hidroeléctricos (2016)	Guía Metodológica para la estimación de Caudal Ambiental en la cuenca del Río Loa (2019)
Propósito	Evaluación ambiental de la alteración de los caudales de uno o más tramos de río, con motivo del desarrollo de un proyecto hidroeléctrico.	Determinación de los caudales que permitan mantener los ecosistemas y los servicios ecosistémicos.
Condición inicial o base del sistema	Condición actual del sistema, considerando todas las modificaciones de caudal existentes en el río.	Condición más “natural” posible de establecer para el sistema con la información y conocimiento recopilado, realizando la construcción de hidrogramas sin extracciones.
Alcance espacial de la evaluación	Se define un área de influencia limitada, la cual se extiende desde el punto de extracción o embalse de las aguas, y con alcance hasta el punto de restitución o hasta donde los efectos del proyecto sean bajos o nulos.	Se evaluará el sistema completo, o al menos, desde el punto de interés ubicado lo más agua arriba, y hasta el término del sistema fluvial o hasta el punto donde el sistema retome su condición natural.

Consideración o variable base de comparación	Guía SEA para determinación del caudal ambiental en proyectos hidroeléctricos (2016)	Guía Metodológica para la estimación de Caudal Ambiental en la cuenca del Río Loa (2019)
Consideración de la afectación aguas abajo	Los efectos son amortiguados hacia aguas abajo y se hacen relevantes solamente las áreas de importancia ambiental actualmente identificadas. De no existir (identificarse) estas áreas, el sistema no cuenta con un valor agua abajo de la zona analizada.	Toda zona ubicada aguas abajo de una intervención contará con algún grado de alteración (afectación) o empobrecimiento, lo cual deberá ser evaluado.
Biota y servicios ecosistémicos existentes	Se deduce la biota presente y los servicios ecosistémicos del río, en base a lo actualmente presente y recopilado en terreno, sin identificar y considerarse condiciones pasadas (o históricas) en los análisis.	Se define la biota y servicios posibles de existir en el sistema para una condición natural del sistema, mediante la estimación teóricas de la condición pasada. Se realizará una validación de la metodología teórica de definición, mediante la estimación de la condición del sistema para el actual régimen de caudales y comparándola con la información levantada en terreno.
Interacción y dependencia entre usuarios	Reconoce solamente las existencia y sinergias entre los usuarios contenidos en el área analizada, sin incluir una cuantificación de los requerimientos de agua por parte de usuarios ubicados aguas abajo.	Considera todos los usuarios existentes a lo largo del río, los cuales son considerados en la evaluación de diferentes escenarios del uso y manejo del río. Cabe señalar que como parte de la determinación del caudal ambiental, solamente se considerarán aquellos servicios de tipo ancestral y los claves (p.ej. consumo de agua para bebida) que se desarrollan o desarrollaron en la condición natural.

Con lo anterior, al contrastar las bases del análisis con las planteadas en la “Guía metodológica para determinar el caudal ambiental para centrales hidroeléctricas en el SEIA” publicada por SEA en 2016 (SEA, 2016) y la cual corresponde a un punto de partida para el actual desarrollo, se tendrá que el análisis y metodología aquí propuesta, parte considerando al río como un sistema integral, sin asumir una desconexión (o no dependencia) entre todas sus partes y usuarios. Con ello, el enfoque requiere una mirada inicial más amplia y general en el inicio del análisis, y con la cual pueda realizarse cualquier evaluación posterior sobre la disponibilidad de recursos y/o condición de los servicios prestados. Aún con ello, gran parte de la metodología para el desarrollo y análisis de habitabilidad y condición de los servicios ecosistémicos será similar al planteado en la guía del SEA (2016), por corresponder ellas al

actual estándar recomendado internacionalmente (Davis and Hirji, 2003; Dyson, 2008; O'Keeffe & Le Quesne, 2009; Harwood et al., 2017; USAID, 2018)

La metodología para el desarrollo de la estimación del caudal ambiental propiamente tal, corresponden a los primeros 5 pasos de los análisis incluidos en el desarrollo y evaluación del caudal ambiental antes indicados (ver Figura 5.1).



Figura 5.1. Pasos asociados a la determinación del caudal ambiental (Fuente: Elaboración propia).

A continuación, se describen las etapas requeridas para la determinación del "caudal ambiental en base a una condición base natural del río", y que en varias de sus partes serán similares a las definiciones encontradas en Guía del SEA (2016).

5.1 Etapa 1: Recopilación/levantamiento de información para la descripción del sistema fluvial.

El cálculo de caudal ambiental debe ser realizado con enfoque en los sectores de mayor relevancia ambiental del sistema fluvial completo, lo cual está basado a su vez en los servicios ecosistémicos presentes a lo largo del río. Así, es indispensable contar con una caracterización del sistema, considerando tanto la condición actual como aquel existente anteriormente bajo condiciones de menor presión y uso del sistema, y de las cuales se tiene evidencia. Así, se tiene como uno de los objetivos principales del cálculo de caudal ambiental, el poder conservar o mejorar las características del sistema. A continuación, se detallan las dos líneas principales de la caracterización donde la primera corresponde a las características del sistema fluvial en sí, lo que permite conocer el funcionamiento y base física que dan origen al río y su

comportamiento. En segundo lugar, se encuentra el levantamiento y caracterización de los servicios ecosistémicos provistos por el río. Con lo anterior, será posible identificar las zonas y los sitios de interés más relevantes, sobre los cuales se basará el análisis del caudal ambiental.

La caracterización del sistema fluvial considerará como base el levantamiento de información respecto del origen y disponibilidad del agua por medio de la hidrología del sistema, además de una caracterización de la morfología del río. Complementariamente se realizarán otras caracterizaciones, asociadas a procesos, características y/o condiciones derivadas de las dos primeras, como lo son las características fisicoquímicas del agua, el régimen del transporte de sedimentos y la ecología del sistema, entre otras.

A continuación, se entregan mayores detalles respecto de las diferentes componentes de la caracterización.

5.1.1 Caracterización hidrológica

La caracterización hidrológica cuenta con una gran relevancia para el estudio de caudal ambiental, ya que a través de ella es posible conocer los regímenes de caudal propios del río. Así, se determinará la probabilidad de ocurrencia de los distintos caudales del río y en las distintas épocas del año.

Como se indicó anteriormente, es necesario realizar un análisis conjunto de la información hidrológica disponible junto con la de derechos de aprovechamiento existentes, con lo cual sea posible construir la hidrología del sistema sin extracciones. Además, se tendrá que considerar para el caso de las extracciones de agua históricas, las que pueden estar asociadas tanto al desarrollo de actividades ancestrales por parte de la comunidad como también aquellas asociadas al consumo de agua, que ellas deben ser incluidas en el funcionamiento natural del río, por deberse a servicios (y derechos) prestados (servidos) por las aguas del río.

Para el desarrollo de la caracterización se deben abordar y desarrollar las siguientes componentes:

- Identificación de extracciones y aportes al río existentes en el sistema: requiriendo ser identificado el uso o motivo por el cual ellas se realizan y con lo cual poder ligarlas a usos y servicios del río.
- Diagramas unifilares: ellos permitirán identificar los tramos de río en que será subdividida la cuenca, dando cuenta de los aportes y extracciones que provocan cambios relevantes en el caudal del río junto con permitir la reconstrucción de la condición “natural” del río necesaria.
- Régimen del río: es obtenido mediante la determinación de las curvas de variación estacional para distintas probabilidades de excedencia, y la identificación del régimen del río según los tipos: nival, pluvial, nivo-pluvial, lacustre, efímero, intermitente, glacial u otro. El análisis debe ser realizado para los distintos tramos identificados en los diagramas unifilares. Junto con el régimen actual del sistema, se deberá reconstruir el régimen “natural” del sistema, para lo cual se considerará que no existen extracciones de caudal más que las históricas que estén asociadas a actividades ancestrales o a consumo de agua.
- Identificar la periodicidad de fenómenos climatológicos y crecidas.

5.1.2 Caracterización morfológica

Para el desarrollo de la caracterización geomorfológica del río, se deberá realizar un análisis morfológico a diferentes escalas, estableciendo posiciones jerárquicas de organización topográfica y litológica de las características del río. Así, se debe considerar que la escala definida por magnitudes físicas del orden de 100 metros hasta los 100 kilómetros de longitud del tramo del río, será el nivel de “Macroescala”, y para magnitudes físicas inferiores y del orden de 10 a 100 metros de longitud de tramo de río se tiene el nivel de “Mesoescala”.

5.1.2.1 Caracterización a nivel de Macroescala

La clasificación a nivel de macroescala dependerá de metodologías del tipo morfológicas y eco-hidrológicas. Para el caso del tipo morfológicas, se propone utilizar el método de Rosgen (Rosgen, 1994) y para el caso del tipo eco-hidrológica se propone emplear la metodología “River Environment Classification” (REC).

- Método Rosgen (1994)

Método que consiste en una clasificación en función a niveles de resolución y alcance de la interpretación visual, estableciendo la siguiente jerarquía:

- Caracterización morfológica general (Nivel I): Se evalúa el tipo, según la forma de relieve del tramo de estudio, de acuerdo con la pendiente longitudinal, sinuosidad y sección transversal (Figura 5.2) definiendo nueve tipos de ríos (A, Aa+, B, C, D, DA, E, F, G).
- Descripción morfológica (Nivel II): Se detalla el tipo de río, ya establecido en el nivel I, en subcategorías (N°1, 2, 3, 4, 5, 6) que relacionan la pendiente, sinuosidad, material predominante en el lecho, ancho de la superficie libre y la relación ancho y profundidad (Figura 5.3).

A pesar de que el método Rosgen posee una clasificación de cuatro niveles, se consideran los primeros dos, los que incorporan el carácter general de la forma del canal y las interpretaciones relacionadas” (Rosgen, 1994).

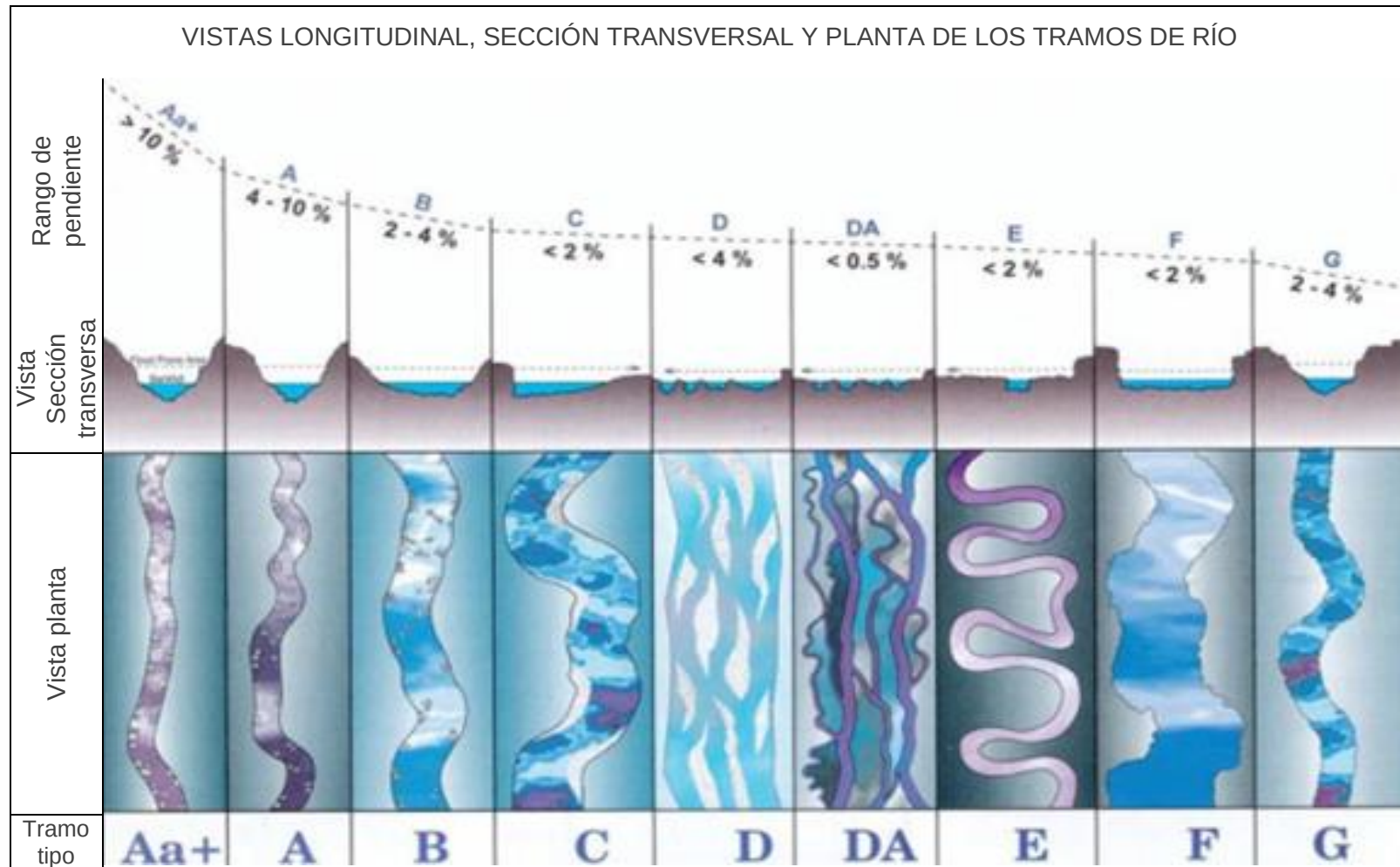


Figura 5.2. Método de Rosgen, caracterización morfológica general (Nivel I) (Fuente: Modificado de Rosgen, D., 1994).

Tramo TIPO		A	B	C	D	DA	E	F	G
Material dominante del lecho	Roca	1							
	Rodados	2							
	Adoquín	3							
	Grava	4							
	Arena	5							
	Limo-Arcilla	6							
Atrinchamiento		< 1,4	1,4 – 2,2	> 2,2	n/d	> 4,0	> 2,2	< 1,4	< 1,4
Ancho/profund.		< 12	> 12	> 12	> 40	< 40	< 12	>12	< 12
Sinuosidad		1,0 - 1,2	> 1,2	> 1,2	n/d	Variable	>1,5	> 1,2	> 1,2
Pendiente		0,04 – 0,099	0,02 – 0,039	< 0,02	< 0,04	< 0,005	< 0,02	< 0,02	0,02 – 0,039

Figura 5.3. Método de Rosgen, descripción morfológica general (Nivel II) (Fuente: Modificado de Rosgen, D., 1994).

- Método “River Environment Classification” (REC)

La clasificación del tipo eco-hidrológica se debe realizar en función de la geografía particular de la región de estudio. La metodología “River environment classification” (REC), se basa en la jerarquía de factores controlados por patrones hidrológicos. La metodología aplicada en Chile (REC-Chile) es multiescalar, permitiendo según los factores controladores seleccionados representar distintos patrones fluviales a diversas escalas espaciales. (Peredo-Parada, 2011).

Los factores de control seleccionados para la implementación de REC-Chile se basan en aquellos utilizados en la REC desarrollada por Snelder y Biggs (2002) para Nueva Zelanda, adaptada a las condiciones climáticas y ambientales de Chile. Los factores de control seleccionados fueron: clima, fuente de flujo, geología, posición relativa de captación, uso de la tierra y pendiente de alcance. Cada uno de estos se subdivide en categorías según el significado de los factores de control. (Peredo-Parada, 2011).

Tabla 5-2. Niveles de clasificación de la REC-Chile, sus categorías y reglas de asignación
(Fuente: Peredo-Parada, 2011)

Nivel	Factor	Categoría	Notación	Regla de asignación		Fuente
				Precipitación efectiva media anual (mm)		
1	Clima	Árido	Ar	≤ 250		(1)
		Semiárido	Sa	250 – 500		
		Medio-húmedo	Mw	500 - 1000		
		Húmedo	W	1000 – 2000		
		Muy húmedo	Vw	2000		
				Precipitación acumulada (%)	Elevación (msnm)	
2	Fuente del flujo	Baja elevación	L	≤ 25	≤ 300	(2)
		Valle	V	25 -40	300 – 1000	
		Media-montaña	Mn	40 -75	1000 – 2400	
		Montaña	M	75 >	2400 – 4200	
		Nieves eternas	Es	Sin precipitación líquida	≥ 4200	(3)
		Lagos	La	Índice de influencia del lago ≥ 0.020		
		Regulado	Rg	Asignación manual		
		Glaciares	G	Área glaciar > 20% Área cuenca		
3	Geología	Depósito no consolidado	Al			(4)
		Plutónico e hipabisal	Pl			
		Volcánico	Vc			
		Sedimentario y sedimentario-volcánico	Mx			
		Metamórfico y sedimentario	Ms			
		Volcánico fracturado	Vf			
		Carbonato	Ca			
		Área sin información	Ni			
				Área aportante salida fluvial (% en área de la cuenca)		
4	Posición salida fluvial	Cabecera	Hw	≤ 7,5		
		Tramo alto	Ur	7,5 – 25		

Nivel	Factor	Categoría	Notación	Regla de asignación	Fuente
		Tramo medio	Mr	25 - 70	(2)
		Tramo bajo	Lr	≥ 70	
		Endorreica	E	Cuenca sin salida fluvial al mar	(5)
		Internacional	I	Cuenca internacional	(5)
5	Uso de suelo	Ciudad	Ci		
		Agricultura	Ag		
		Pradera y arbustos	Ps		
		Bosque	Wo		
		Área sin vegetación	Nv		
		Reservorio	R		
		Humedales	Wt		(6)
		Nieve and glaciares	Sg		
				Slope (%)	
6	Pendiente	Alta	Hi	> 0,04	
		Media	Md	0,04 – 0,02	(3)
		Baja	Lw	≤ 0,02	

(1) Climate classification of Blair / (2) Own construction / (3) Snelder et al. (2005) / (4) Lithology (DGA) / (5) Hydrological network (DGA) / (6) Land Use (DGA).

5.1.2.2 Caracterización a nivel de Mesoescala

El nivel de mesoescala, es aquel que considera la forma fluvial del cauce, la presencia de fauna íctica nativa o de especies especiales y la actividad antrópica relevante de la zona. Por consiguiente, esta metodología describe dos tópicos relevantes, los cuales son: la morfología del cauce y el tipo de hábitat del tramo de río. En el caso de describir la morfología del cauce, los factores que determinan su clasificación son la forma vista en planta del sistema y las características de la sección transversal que presenten, los cuales pueden denominarse como: tramos rectos, meandrosos, trezados o alguna combinación de ellos (Higginson & Johnston, 1988) (Figura 5.4).

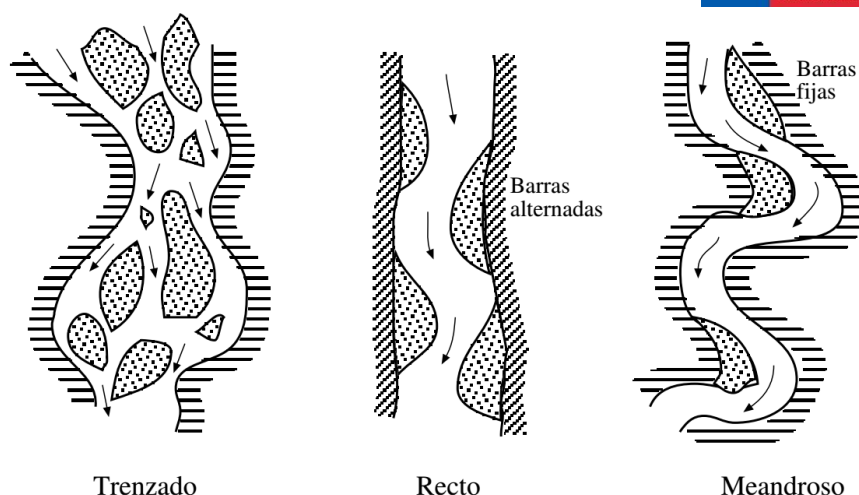


Figura 5.4. Patrones morfológicos típicos de ríos (Fuente: Modificado de Higginson & Johnston, 1988).

Con respecto a la identificación de los diferentes hábitats presentes en un tramo de río a nivel de mesoescala, ellos se denominan unidades hidromorfológicas o mesohábitat. Para su clasificación se consideran el uso de las metodologías de Montgomery & Buffington (1997) (Tabla 5-3; Figura 5.5) y de Parasiewicz (2007) (Tabla 5-4), las cuales realizan una clasificación en función de la morfología del cauce, considerando el perfil longitudinal y las características de escurrimiento, respectivamente.

Tabla 5-3. Simbología para clasificación de mesohábitats (Montgomery & Buffington, 1997)

Simbología	Clasificación
A	Cascada.
B	Secuencia de saltos y pozas.
C	Lechos planos.
D	Secuencia de corrientes y pozas.
E	Cauce de Duna con ondulación

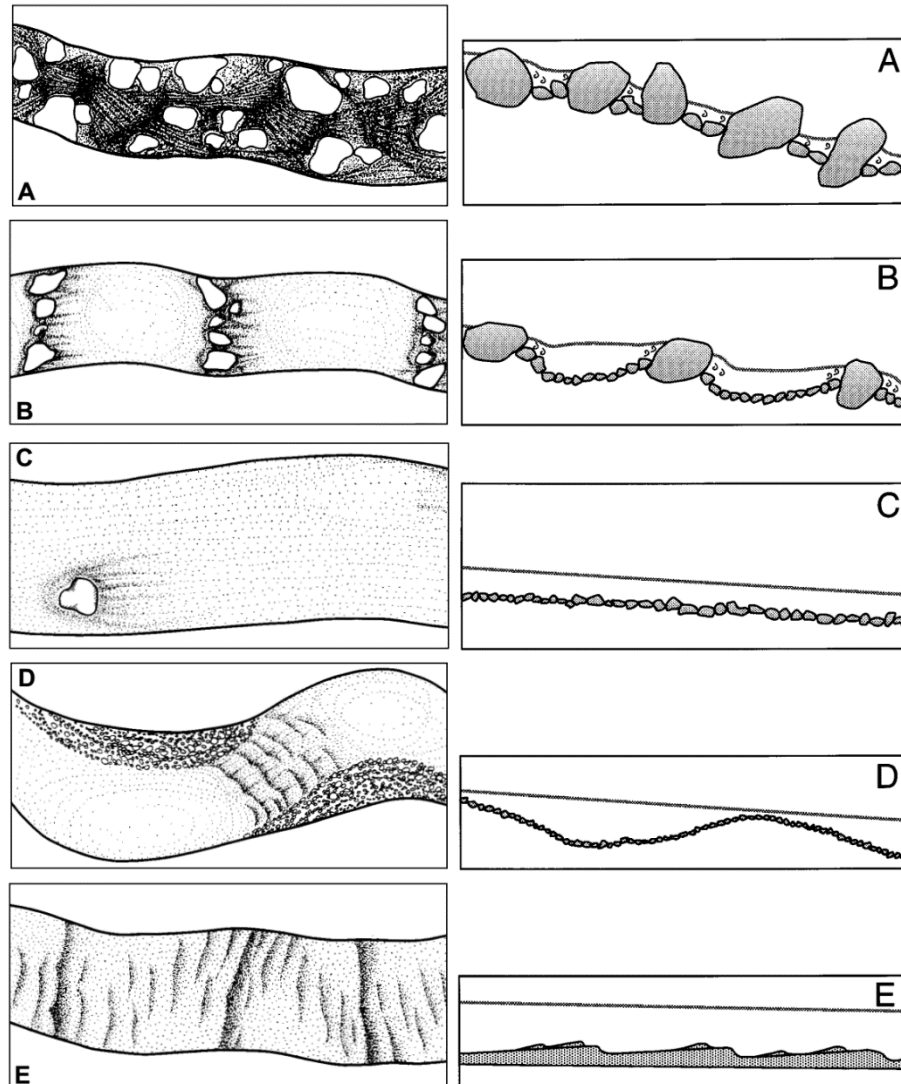


Figura 5.5. Clasificación por perfiles transversales y longitudinales de mesohábitats (Fuente: Montgomery & Buffington, 1997).

Tabla 5-4. Descripción de unidades hidromorfológicas o mesohábitat (Parasiewicz., 2007)

Tipo de Meso hábitat	Unidad Hidromorfológica	Características
Rápidos	Corriente (Riffle)	Escurrimiento somero- Velocidad moderada- Superficie turbulenta-Pendiente alta- Forma lecho convexo.
	Rápido (Rapid)	Tramo de gradiente elevado-Velocidad alta-Mayor superficie turbulenta- forma lecho convexo- presencia sustrato grueso.
	Cascada (Cascade)	Rápidos escalonados-caídas de agua bajas-pozas de agua pequeñas detrás de rocas.
	Run	Flujo permanente- Talweg definido- Cauce longitudinalmente plano y lateralmente cóncavo.
	Ruffle	Transición entre “Rápidos” (Para Run o Riffle).
	Fast Run	Flujo rápido uniforme.
Lentos	Poza (Pool)	Aguas profundas por obstrucción parcial o total- Velocidad baja- Forma lecho cóncava.
	Poza de salto (Plunge Pool)	Flujo sobre obstrucción completa- con caída vertical aguas abajo.
	Remanso (Backwater)	Velocidad baja en márgenes del cauce por vórtices aguas debajo de obstrucción
	Tabla (Glide)	Flujo laminar en aguas someras - Sin presencia de turbulencia - Forma de lecho plano
Otros	Brazo lateral (Side Arm)	Cauces alrededor de islas, menores que la mitad del ancho del río- Con frecuencia a distintas elevaciones.

5.1.3 Otras caracterizaciones

Otras de las caracterizaciones que deben ser realizadas, y cuyas metodologías y bases de la caracterización se dejan abierta al ejecutor son:

- Transporte de sedimentos: Reconocer zonas de potencial erosión o deposición. Puede ser mediante el uso de un modelo hidráulico u otro método teórico.
- Caracterización fisicoquímica de las aguas: Determinar si las características de las aguas de los distintos tramos en el área de estudio son aptas para la vida acuática y para su utilización en regadío y recreación con contacto directo, según la NCh1333 Of.78 y DS143/2009.
- Caracterización ecológica: Se refiere esencialmente al estudio de la biota en el ecosistema fluvial, clasificándolas según su categoría de conservación.
- Caracterización de zonas ribereñas: Considerar la descripción de vegetación y de los sedimentos fluviales.
- Caracterización antrópica: Identificar actividades productivas o recreativas relacionadas a las aguas o riberas del río.
- Otras funciones de cambio de variables relevantes: En cuanto a las funciones de cambio de otras variables, se deberá conceptualizar (al menos de forma aproximada) cuales son las funciones de cambio de la(s) variable(s) relevantes a lo largo del río, y con lo cual poder establecer una banda (rango) de sus valores en el río bajo la condición “natural”. Ejemplos de otras variables que son relevantes por

forzar la condición del sistema, son las indicadas en el estudio DGA-CEA (2008) para las diferentes zonas (norte, centro y sur) del país.

Para caracterizar estos componentes, y en el caso en que no se cuenta con información suficiente, se debe considerar la necesidad de levantar información en terreno.

5.2 Etapa 2: Definición de variables relevantes del sistema y determinación de la condición no alterada o “natural” del sistema

Como parte de las variables relevantes del sistema, primeramente se reconoce la condición hidrológica del mismo como conductor de la condición. Es por ello que, primero se mostrarán antecedentes sobre la hidrología del sistema y para la determinación de la condición “natural” asociada, para luego entregar antecedentes sobre la revisión, identificación y desarrollo de las otras variables relevantes del sistema y su condición “natural”.

5.2.1 Hidrología del sistema

Para establecer una condición no alterada para un sistema fluvial, se debe realizar el análisis del sistema para la determinación del régimen hidrológico sin alteraciones. Esto último difiere de lo planteado en la Guía del SEA (2016), en donde se reconoce la condición actual como la natural del río. Esta diferencia radica en las diferencias del enfoque y finalidad del análisis como se ha mencionado en secciones anteriores, en donde la Guía del SEA busca **evaluar un nuevo proyecto** bajo el supuesto de mantener la condición actual del sistema, y el análisis aquí propuesto busca determinar **una condición mínima de caudal para sostener el ecosistema y todos sus servicios**.

Con el fin de poder reconstruir la condición sin extracciones, es necesario el levantamiento tanto de las entradas como de las salidas de caudal que actualmente existen en el sistema, y con lo cual poder comprender las variaciones de caudal en el mismo. Junto con identificar los derechos de extracción y su tipo, será necesario el levantamiento de la ubicación de estos, y con lo cual poder construir el diagrama unifilar, el cual permita representar la distribución de las entradas y salidas del sistema (ejemplo en Figura 5.6). Como se indica en la Guía del SEA (2008), existen variadas fuentes de información al respecto, como lo son el Catastro Público de Aguas (web de la DGA), realizar una solicitud al Departamento de Administración de Recursos Hídricos de la DGA, o realizar una solicitud por medio de Ley de Transparencia (por medio del “Formulario de Solicitudes Documentales Ley de Transparencia” en la web de la DGA).

Se debe considerar que para la definición del funcionamiento y dinámica de un sistema, no siempre bastará con una reconstrucción del hidrograma en base a extracciones y aportes directos de caudal, existiendo otras configuraciones que requerirán de la utilización/implementación de herramientas hidrológicas más complejas. Así por ejemplo, el río Loa presenta una configuración bastante compleja, contando con aportes de tipo:

- Difusos: aportes posibles por escorrentía superficial hacia el cauce y posibles recargas desde la napa a lo largo del recorrido del río.
- Directos superficiales: aportes de caudal entregados por afluentes directos.
- Directos subsuperficiales: aportes de caudal puntuales o acotados, generados por afloramientos de aguas subterráneas hacia el río.

Así, una configuración compleja como la del río Loa requerirá de las herramientas hidrológicas que permitan conceptualizar los diferentes tipos de fuentes de recursos y realizar una cuantificación acertada del agua disponible en cada sector.

Actualmente, un tipo de herramienta con alto valor para la estimación y manejo de los recursos de agua superficiales, corresponde a los modelos hidrológicos. Este tipo de modelo corresponde a un conjunto de algoritmos matemáticos, que tienen como objetivo el poder aproximar las interacciones entre distintos elementos del ciclo hidrológico. Los modelos disponibles actualmente se diferencian en sus aproximaciones a los procesos a resolver, en el cómo es conceptualizada la cuenca, el nivel de detalle y precisión, y cantidad de información de entrada requerida. Así, a nivel mundial existen varios modelos generales de cuenca o de simulación hidrológica, donde las componentes individuales de estos modelos varían significativamente debido a la diversidad de propósitos que sirven (Singh & Frevert, 2005). Uno de los modelos que cuenta con gran uso a nivel internacional, altas capacidades para la implementación, alto grado de soporte y desarrollo, es el modelo numérico WEAP (“Water Evaluation and Planning”) desarrollado por el Stockholm Environment Institute's U.S. Center (Sieber, 2019), el cual se presenta como una opción adecuada para la implementación en un sistema complejo como el río Loa.

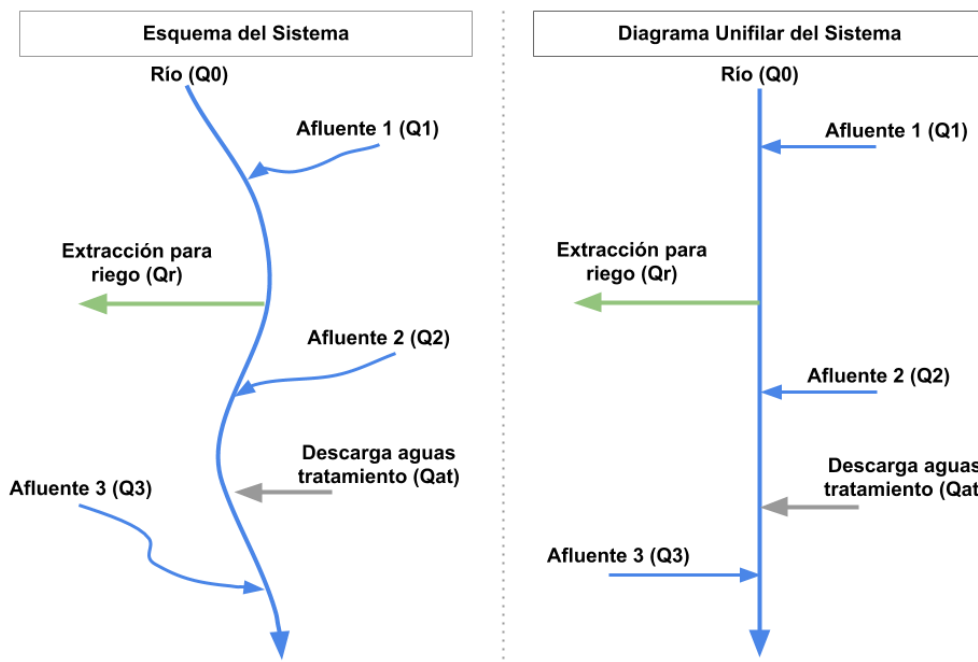


Figura 5.6. Ejemplo de diagrama unifilar para río hipotético. (Fuente: Elaboración propia).

Contando con el diagrama unifilar, es posible estimar el régimen natural del río completo, restituyendo las extracciones en el hidrograma y restando los aportes externos al sistema. Junto con lo anterior, el diagrama unifilar permitirá realizar una primera subdivisión del sistema para la modelación y contar con información sobre los caudales pasantes por cada uno de ellos, para luego poder realizar nuevas divisiones necesarias en la modelación en base a condiciones hidráulicas particulares como desconexiones del flujo, y existencia de singularidades, entre otras. Debe recordarse que el análisis de caudal ambiental es integral sobre el río, es decir, aun cuando se realice el análisis separado de cada una de las partes que lo componen, el resultado final está dado tras la integración de ellos mediante un análisis de las dependencias entre tramos y relaciones de las variables.

Como parte de la caracterización y definición del régimen de caudal ambiental del río, se requiere determinar las crecidas o condiciones de mayor caudal que permiten la mantención del río (cauce y riberas). En particular, estos caudales serán los encargados de mantener su morfología, y están asociada a las crecidas ordinarias del sistema. Estas crecidas son pequeñas y ocurren en una escala de tiempo de algunos años. Por su relevancia en la mantención del sistema, estas crecidas serán consideradas como el “caudal formativo”, el cual corresponde a un concepto de la mecánica fluvial y que ha sido ampliamente estudiado. Diversos autores han realizado propuestas para la determinación de este caudal, dentro de las cuales se encuentra el método de asumir un “intervalo específico de recurrencia del caudal” (García, 2008), el cual se presenta como una buena herramienta. En la Tabla 5-5 se muestra un resumen de las diferentes aproximaciones realizadas para la estimación de este caudal, pudiéndose observar que los períodos podrán ir (dependiendo del caso) desde 1 año hasta los 32 años (según Williams, 1978). Aún con este amplio rango, el conceso general corresponde a que si es utilizada esta aproximación, un rango aproximado entre 1 y 3 años debe ser utilizado. Cabe señalar que dada la incertidumbre de la utilización de esta aproximación, se recomienda comparar los caudales y condiciones de escurrimiento asociadas a este rango respecto de la condición de terreno de caudal de cauce lleno (“bank-full discharge”), con lo cual podrá verificarse que estos caudales pudieran tener significancia en la definición de la morfología (Capítulo 6 en García, 2008).

Tabla 5-5: Frecuencia del caudal según diferentes autores para la determinación del caudal formativo mediante el método de “Intervalo específico de recurrencia del caudal”. (Fuente: Extraído desde García, 2008).

Frecuencia del caudal (Período de retorno)	Velocidad (m/s)
1 a 5 años	Wolman y Leopold (1957)
1.5 años	Leopold et al. (1964); Hey (1975); Leopold (1994)
1.58 años	Dury (19763, 1976); Riley (1976)
1.02 a 2.69 años	Woodyer (1968)
1.01 a 32 años	Williams (1978)
1.18 a 3.26 años	Andrews (1980)
1 a 10 años, 2 años	USACE (1994)
2 años	Bray (1973, 1982)

Finalmente, con la determinación de los hidrogramas asociados a la situación no alterada del sistema, se deberá definir una condición media que represente el estado “natural” del sistema. En la presente guía se considera como un criterio razonable, la utilización de la condición media de caudales del sistema, dada por la serie de caudales con probabilidad de excedencia del 50%. Así, es a esta serie de tiempo sobre la cual se realizará la definición de la serie de caudal ambiental.

5.2.2 Otras variables relevantes del sistema

Junto con la determinación de la condición hidrológica (hidráulica) no alterada del sistema, es necesaria la revisión e identificación de otras variables relevantes, las cuales definen (promoviendo o limitando) las características y composición del sistema fluvial en términos de su biología y desarrollo de ecosistemas. Como fue indicado, la biología y los ecosistemas desarrollados en los ríos, no solo dependerá de las condiciones y características hidromorfológicas, sino que cuentan con una estrecha relación con las características fisicoquímicas del agua. Así, serán relevantes en la definición de las condiciones base, o

las más naturales conocidas, variables como la salinidad, la temperatura o la presencia de materia orgánica.

El estudio “Determinación de caudales ecológicos en cuencas con fauna íctica nativa y en estado de conservación”, desarrollado por el CEA para la DGA (DGA-CEA, 2008), concluye que *“es necesario realizar un análisis diferencial de ríos localizados en cuencas exorreicas a lo largo de Chile, ya que aun cuando las condiciones hidrológicas e hidrodinámicas constituyen el proceso que mantiene los ecosistemas acuáticos, se debe complementar el análisis con un balance de masa de sales (ríos zona norte), balance de masa de nutrientes (zona centro-sur) y balance térmico (zona austral)”*. Por lo anterior, es necesario realizar un análisis previo para la identificación de las variables relevantes de cada sistema, en términos de contar con una evaluación de ellas como parte de las variables de estado/condición del hábitat y/o servicio ecosistémico. En el caso del río Loa que está presente en al Hidroecoregión “Loa-Camarones”, se tiene que uno de los conductores principales de la condición y biología del sistema, recae en la salinidad y su distribución a lo largo del río (DGA-CEA, 2008), por lo que esta variable será incluida como parte del análisis desarrollado. Para ello, se realizará una parametrización/caracterización de ella a lo largo del río, la cual permita también ser aplicada a diferentes escenarios.

5.3 Etapa 3: Análisis de la biota y servicios ecosistémicos del sistema

La revisión de toda la información recopilada sobre la biota permitirá realizar un análisis de la presencia, el estado y funciones de habitabilidad de todas las especies presentes en el sistema. Estas últimas corresponderá a la base del análisis de la condición del sistema, en términos de la disponibilidad de hábitat y las condiciones de este para el desarrollo de la biota y la mantención de su biodiversidad.

De acuerdo con la revisión de antecedentes relacionados a los sistemas fluviales, se plantea como definición conceptual de los Servicios Ecosistémicos (SE) del río, “a aquellos que brindan los ecosistemas: protección de la biodiversidad y conservación de los hábitats acuáticos, belleza escénica o paisajismo y el turismo asociado”. Esta aproximación conceptual es similar a lo definido como usos del agua para fines ambientales por la Política Nacional de Recursos Hídricos, los cuales son proporcionados por un caudal mínimo ecológico. Al respecto, se plantea que cuando se habla de “usos” y/o “servicios del agua”, se asume la existencia implícita de la libre voluntad de ejercerlo (el uso) por el hombre. Por lo tanto, los valores de usos indirectos o de opción del agua (otros usos y/o usuarios), implican necesariamente un beneficio. Esto último es concordante con que la valoración económica del agua, implica la valoración de los servicios del recurso, más que el valor intrínseco del recurso. Por lo anterior, se entregarán antecedentes respecto de la clasificación y contabilización (valoración) de los servicios.

A continuación, se desarrollan las componentes para el análisis de la biota y de los servicios ecosistémicos del sistema.

5.3.1 Biota presente en el sistema

Con la información indirecta recopilada junto con los datos obtenidos en las campañas de terreno, se construirá un listado base sobre la biota presente en el sistema, y la cual depende de forma directa del escurrimiento. Considerando el listado de especies, se deberá realizar un análisis de relevancia de ellas (priorización), en términos ecológicos, ecosistémicos y según grado de conservación (si es que lo tiene). Las especies identificadas podrán ser priorizadas según su relevancia general cuando su número sea

muy grande, para con ello reducir el listado y permitir el desarrollo del análisis de forma eficiente.

Para cada una de las especies del listado seleccionado, se deberá realizar una caracterización y conceptualización de su comportamiento, mediante el desarrollo de curvas de habitabilidad o preferencia, donde cada especie contará con una curva para cada variable identificada como relevantes en el desarrollo y condición del sistema. A modo de ejemplo, para la ictiofauna serán requeridas como base las curvas de preferencia que den cuenta de las condiciones hidráulicas del flujo (velocidad y altura del escurrimiento) junto con las de otras variables relevantes, como pueden ser el rango de temperatura o salinidad que tolera (prefiere) cada especie. Un ejemplo de curva de habitabilidad y del rango de tolerancia a la salinidad de especies posibles de ser encontradas en ríos, se muestra en la Figura 5.7, donde las curvas son las desarrolladas en el estudio “Determinación del caudal mínimo ecológico del proyecto hidroeléctrico Quilleco en el río Laja, considerando variables asociadas a la biodiversidad y disponibilidad de hábitats” de EULA (2000); y los rangos de tolerancia a la salinidad fueron compilados principalmente desde el estudio “Effects of increasing salinity on freshwater ecosystems in Australia” de Nielsen et al. (Nielsen et al., 2003).

Cabe señalar que el trabajo de construcción de las curvas será realizado en base a la teoría y conocimiento científico, debido a que para muchas de las especies no será posible o no existirá información de campo suficiente para realizar la construcción de las curvas. Lo anterior podrá deberse al hecho de que la condición actual posible de ser levantada en terreno, puede corresponder a un estado alejado de la condición más “natural” del sistema, por lo que no existirán los datos de campo necesarios. Aun así, el conocimiento científico es capaz de entregar información y criterios suficientes para una caracterización aproximada del comportamiento, lo cual podrá estar basado en evidencia específica de cada especie o basado en asociación a otra, con la cual comparta tanto el tipo de ecosistema que habitan como semejanzas fisiológicas (p.ej. tamaño en los diferentes estadios, período del año de desove y migración, entre otras).

Las curvas obtenidas para cada especie, corresponderán a la base del análisis de habitabilidad en la evaluación del estado del sistema.

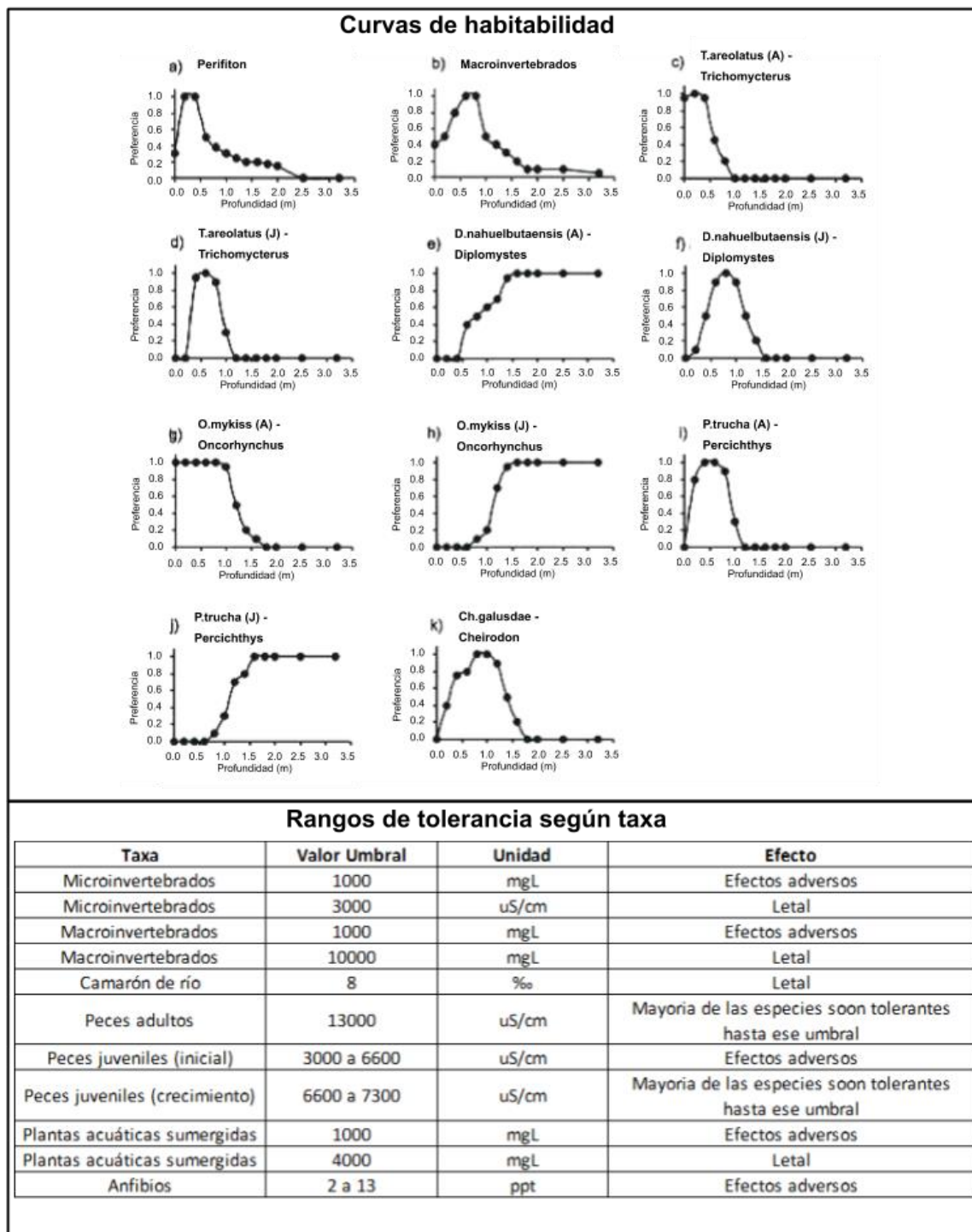


Figura 5.7. Ejemplo de curvas de habitabilidad de especie de fauna íctica construidas en río Laja por EULA (2000) y rangos de tolerancia de especies a la salinidad. (Fuente: Elaboración propia).

5.3.2 Usos y servicios del agua en la cuenca

De la información indirecta recopilada, de lo evidenciado en las campañas de terreno y del conocimiento e historia transmitida por parte de lugareños y habitantes de zonas que se desarrollan en las inmediaciones del río analizado (y que dependen de alguna forma de la existencia del recurso), se deberá definir un listado de todos los tipos de usos y servicios del agua que existen en la cuenca. Los diferentes servicios deberán ser clasificados según el tipo de uso de recurso o si ellos son dependientes solamente de la existencia del recurso (indirectos). De entre ellos, y considerando la Cuenca del Río Loa como sistema de ejemplo, es posible nombrar los siguientes:

- a) Usos directos (consuntivos y no consuntivos):
 - Agua para riego agrícola y consumo animal (ganadería) - consuntivo
 - Uso doméstico (agua potable) - consuntivo
 - Uso industrial – consuntivo y no consuntivo
 - Uso minero – consuntivo y no consuntivo
 - Generación de energía hidroeléctrica –no consuntivo

- b) Usos indirectos o servicios ambientales
 - Conservación de la vida acuática (biodiversidad)
 - Utilización como refugio de fauna y flora
 - Reserva natural (abastecimiento de aguas subterráneas)
 - Recepción y purificación de desechos
 - Recreación por contacto directo (natación, playas y otros)
 - Turismo por contacto indirecto (fotografía, caminatas, camping y picnic, lugares de observación)
 - Paisajismo (contemplación estética)
 - Navegación comercial (turismo) y recreativa (pesca)

5.3.3 Clasificación CICES

La Clasificación Internacional Común de los Servicios de los Ecosistemas (CICES) se desarrolló a partir del trabajo sobre contabilidad (valorización) ambiental realizado por la “Agencia Europea del Medio Ambiente” (AEMA). Además, apoya al desarrollo la revisión del “Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica” (SCAE), que actualmente dirige la “División de Estadística de las Naciones Unidas” (UNSD), y donde ha sido recientemente publicada la versión CICES v5.1 (Haines-Young and Potschin, 2018). Este último documento se encarga de actualizar, mejorar y completar la estructura y alcance de la anterior versión v4.3 del 2013, sobre la base de la experiencia adquirida por la comunidad de usuarios tras su publicación.

La sigla CICES está dada por la abreviación del inglés “Common International Classification of Ecosystem Services”, y corresponde a una clasificación internacional desarrollada al reconocerse que, si se elaboran métodos de contabilidad de ecosistemas y se realizan comparaciones, es necesario contar con una estandarización en la forma en que se describen los servicios de los ecosistemas. De este modo, se consideró que la normalización era especialmente importante cuando es necesario establecer un vínculo con la contabilidad económica.

El marco conceptual de los Servicios Ecosistémicos que se propone está basado en lo reportado por Boyd (Boyd J, 2007), el cual se resume en el diagrama de la Figura 5.8. Este diagrama es conocido como la “Cascada de los Servicios Ecosistémicos” (CSE), la cual conecta lógicamente y sucintamente las estructuras y procesos ecosistémicos, con los elementos que afectan el bienestar humano a través de una especie de “cadena de producción”. De esta manera, la CSE demuestra que se requiere de estructuras ecosistémicas funcionales para la generación de servicios ecosistémicos y de los consiguientes beneficios asociados a ellos (Potschin, 2011). En otras palabras, la CSE revela que para obtener un flujo continuo de SE, se requiere proteger y conservar los ecosistemas y la biodiversidad que les dan sustento.

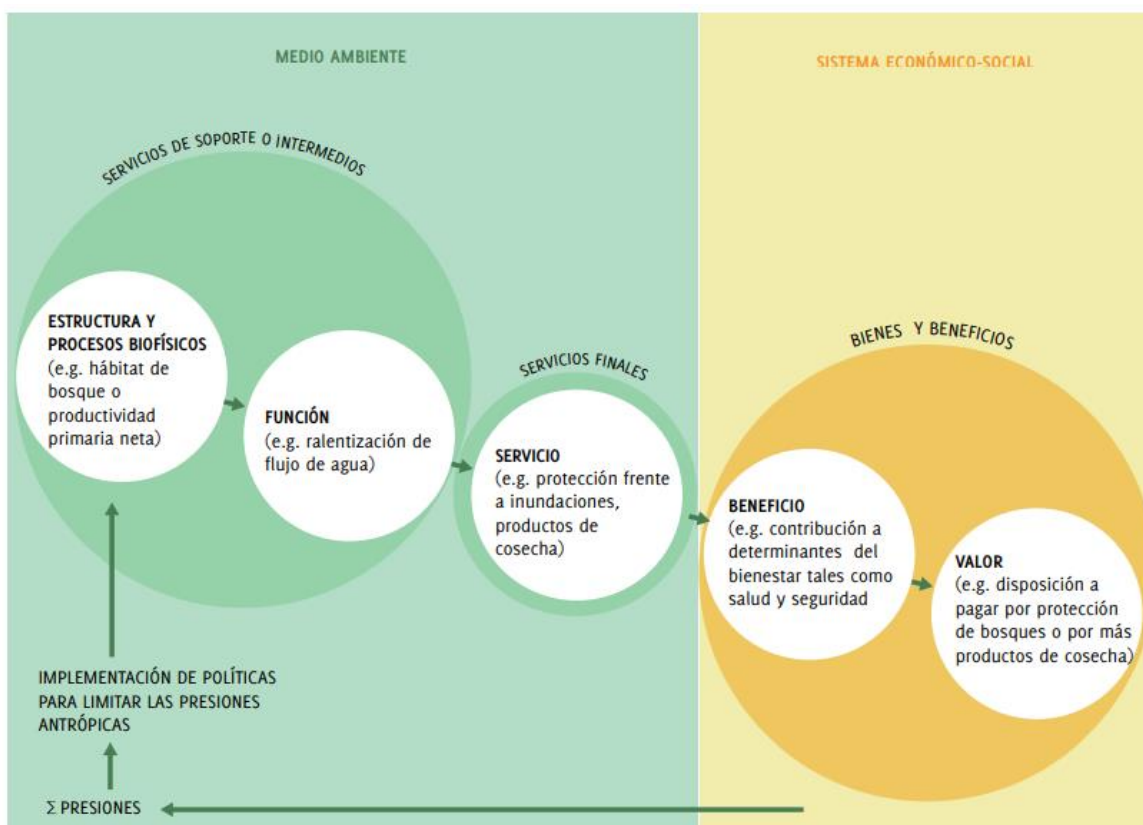


Figura 5.8. Marco conceptual: La Cascada de los Servicios Ecosistémicos (CSE). Fuente: (Haines-Young R. et al., 2012)

La clasificación CICES propone tres categorías de servicios ecosistémicos, los cuales corresponden a:

- Servicios de aprovisionamiento
- Servicio de mantención o regulación
- Servicios culturales

Dentro de cada una de estas categorías se podrá discriminar entre servicios bióticos y abióticos.

5.4 Etapa 4: Definición de ecosistemas en condición de referencia (“natural”) y actual

5.4.1 Aproximación Metodológica para las “Condiciones de Referencia”

La gestión de los recursos hídricos en Chile ha estado orientada principalmente a los cursos de agua permanentes y de uso no consuntivo. De acuerdo con los antecedentes entregados más arriba, el desarrollo de la evaluación de estado ecológico y la determinación de caudales ambientales, definidos como la fuerza motora fundamental para la determinación de la integridad de los ríos y su biodiversidad, puede desarrollarse en consideración de algunas aproximaciones más innovadoras y que incorporan de mejor manera ríos afectados por usos no consuntivos y consuntivos.

Para el desarrollo de las evaluaciones ambientales del caudal se propone:

- Definir la condición de ecosistemas históricos, concepto subyacente al desarrollo de las líneas base y condiciones de referencia, usadas en los estudios de impacto ambiental y así evaluar los cambios potenciales de la biodiversidad y servicios ecosistémicos. En este concepto subyace también la idea de estabilidad y resiliencia de los ecosistemas, para retornar a un estado estable en el ambiente.
- Definir la condición de ecosistemas en ríos regulados y con desviaciones de parte de su caudal, pudiendo retornar a un estado ecológico que se aproxime a las condiciones históricas de los ecosistemas.
- Planteamiento de metas u objetivos **mínimos** para mantener la biodiversidad actual y los niveles de servicios ecosistémicos que hoy proveen los ríos, dado que es posible que algunos ecosistemas no puedan retornar a sus estados históricos.
- Analizar la biodiversidad y funcionamiento ecosistémico de los ríos mediante el uso de modelos conceptuales o hipótesis reconocidas en el ámbito de la ecología, que permitan explicar las respuestas potenciales de los sistemas fluviales desde un punto de vista ecológico.

El esquema permite relacionar el caudal, objeto de las demandas de uso del agua de los ríos, con las hipótesis de funcionamiento de los ríos como ecosistemas y de su biodiversidad, aceptadas en el ámbito de la ecología.

La descripción ecológica podría ser establecida en un documento denominado “modelo de referencia que sintetiza toda la información que es necesaria para el diseño y planificación de un proyecto de restauración (Clewell & Aronson, 2013.)

En Chile, la información de los ríos como ecosistemas tiene un desarrollo reciente, y solamente en la última década se ha desarrollado investigación desde el punto de vista biológico, y más recientemente desde el punto de vista ecológico. Por otra parte, la información de los aspectos hidrológicos se ha centrado especialmente en el registro de los caudales para su uso. El Ministerio de Obras Públicas (MOP), a través de la Dirección General de Aguas (DGA), es el organismo que registra los caudales para otorgamiento y administración.

En este contexto de información en Chile, y los antecedentes teóricos indicados más arriba, es conveniente definir una aproximación a las condiciones de referencia de los ecosistemas de ríos, basados en el caudal ambiental, como un aspecto fundamental. Esto significa que los datos de caudales de los ríos, son básicos para desarrollar una aproximación de “caudales naturalizados” como condición de referencia de los ecosistemas. Simultáneamente, considerar la información de grupos de organismos que se usan como descriptores de la condición del río, como son los peces, macroinvertebrados bentónicos, diatomeas y plantas de la vegetación ripariana, todos conforman los componentes bióticos de los ecosistemas. Estos grupos se caracterizan en función de su composición y abundancia, asociados a características físicas y químicas tanto del caudal como del sustrato. También pueden incluirse características geomorfológicas del río, tales como la formación de canales y su dinámica.

En Chile, la información referente a las características bióticas de los ríos sin intervención antrópica a lo largo de su eje longitudinal, es escasa. Los datos se han obtenido principalmente en las últimas décadas, y sólo para unos pocos ríos, mucho después que se iniciara el uso consuntivo de agua en sus cuencas. Así, es difícil determinar una “condición de referencia” que se aproxime a un estado natural o con una baja intervención antrópica, o de una condición histórica en relación con estos componentes. Por otra parte, ecológicamente la “condición de referencia” se origina en la idea de un estado estable único y que en la actualidad ha cambiado, aceptándose que pueden existir varios estados estables para un ecosistema. En este contexto de conocimiento, las observaciones actuales difícilmente pueden ser usadas como representativas de las condiciones no perturbadas o mínimamente perturbadas o históricas. Entonces, se propone considerar el estado actual, como un punto en un gradiente de cambio temporal de los ecosistemas ribereños. En los casos que existiera información documentada (descripciones pasadas), ella podría considerarse como (o parte de) la “condición de referencia”. Por otra parte, los ecosistemas cambian a lo largo del eje longitudinal del río, tal como ha sido propuesto por la idea del “río continuo” (Vannote et al 1980), lo que implica obtener para varias localidades los antecedentes para establecer las “condiciones de referencia” respectivas de esos ecosistemas.

Dado que la aproximación de “condiciones de referencia” asume o supone un estado de estabilidad único de los ecosistemas, y la evidencia actual es que más bien ocurren múltiples estados estables, es más apropiado considerar que existen varios estados, que son fuertemente dependientes del “régimen de caudal actual”. En relación con las características abióticas de los ríos, las condiciones de referencia pueden ser aspectos como el sustrato, propiedades fisicoquímicas del agua o el caudal con sus distintos componentes. Dada la existencia de registros de caudal, al menos de algunas décadas y

en los principales ríos de Chile, sería conveniente usar el “régimen del caudal” como la variable con más información y establecer con ella una condición de referencia. En el caso que existan antecedentes sobre los componentes biológicos, se pueden establecer “condiciones de referencia” para grupos de organismos como peces, macrófitas, macroinvertebrados y diatomeas bentónicas.

5.4.1.1 Área de los Ecosistemas, Especies y Hábitat

Dada la importancia del caudal en los ecosistemas de ríos, el régimen del caudal es determinante para el área (espacio) que ocupan los ecosistemas a lo largo de los ejes longitudinales y laterales en los cursos de agua. Así, desde el punto de vista espacial, los ecosistemas tienen una extensión en concordancia con el régimen del caudal. Los cambios en el caudal pueden afectar la distribución de especies acuáticas como peces, macroinvertebrados, microalgas y vegetación ripariana. Por otra parte, el régimen del caudal y las características físicas y químicas del agua, determinan la presencia de las especies acuáticas y, en consecuencia, su distribución espacial. La expresión espacial de las propiedades que determinan la presencia de las especies o grupos de especies, representan el *área del hábitat* para esos organismos.

Entonces, cambios en el régimen del caudal natural afectan la extensión o área de los ecosistemas y de las especies, teniéndose que distintos escenarios de caudal o del régimen del caudal, pueden proveer una “condición de referencia” de los ecosistemas y de la extensión del área de distribución de las especies a lo largo de los ríos.

Lo anterior permitirá estimar la distribución espacial de las especies en los ecosistemas acuáticos y riparianos, y sus localizaciones espaciales en función de sus características de hábitat en cada escenario, tomándose como condición de referencia la composición de especies presentes, e incluyendo aquellas especies posibles de estar presentes tanto en el eje longitudinal como lateral del río, en función de las características del hábitat de ellas, con la información actual disponible.

En términos prácticos, con la actual distribución de especies a lo largo del sistema, entendidas ellas como constitutivas de los ecosistemas y como “condición de referencia” del estado del mismo, se asumirá la posible expansión, contracción y/o desplazamiento de los espacios hoy por ellas ocupados, ante cambios en los caudales pasantes o régimen del caudal.

Con lo anterior, se utilizará la condición de referencia del caudal (naturalizado) para determinar la localización aproximada de los ecosistemas de referencia (distribución y o área del hábitat de las especies). Este resultado será comparable contra la condición dada por el régimen de caudal actual o cualquier otro escenario futuro propuesto.

Es esta condición de referencia (dada por el caudal, la distribución de especies y la condición del hábitat para ellas) la que será utilizada para la definición del régimen de caudal ambiental.

Finalmente, la evaluación del estado del sistema se basará en evaluar tanto la condición de las diferentes especies como la distribución de ellas, pudiéndose evaluar y comparar los diferentes escenarios (inclusive escenarios futuros de gestión).

5.4.2 Definición Áreas de Evaluación de la Condición

Considerando la existencia de una definición para el tipo y extensión de los ecosistemas potenciales a lo largo del río, en cada uno de ellos se deberán identificar (definir) las áreas relevantes para el análisis. Así, similar al concepto de “Áreas de Importancia Ambiental” (AIA) definido en la Guía metodológica del SEA (2016), se deberán seleccionar las “Áreas para la Evaluación de la Condición” (AEC). Ellas corresponderán a tramos de río que sean característicos de los ecosistemas identificados, y en los cuales se desarrolla tanto la biota (símil a “Área de Importancia Ecológica”-AIE en SEA, 2016) como los servicios ecosistémicos (símil a “Área de Uso Antrópico”-AUA en SEA, 2016). Estas áreas deben ser individualizadas, georreferenciadas y mapeadas, de forma de identificarlas de forma clara dentro de la cuenca.

Los sectores relevantes para el desarrollo de la biota, primera componente de las AEC, son aquellos que mantiene la heterogeneidad de hábitats del sistema fluvial, permitiendo conservar la biodiversidad del ecosistema. Éstas deben ser identificadas en base a la definición de ecosistemas y la caracterización del sistema. Producto de la extensión del río en estudio, será necesario definir varias AEC y considerando las singularidades del río que logran modificar las condiciones de hábitat y el desarrollo de diferentes ecosistemas. Las singularidades que pueden existir en el río incluyen a todas aquellas que puedan generar un cambio brusco en el sistema, como por ejemplo, un afluente que genera un aumento significativo de caudal y provoca un cambio en la dinámica fluvial, o un cambio brusco de pendiente que desconecte el flujo o cambie el régimen del flujo (p.ej. de torrente a río).

Uno de los criterios posibles de ser utilizados en la definición de las áreas de evaluación, podrá ser la potencial presencia de especies (biota) en él, las que pueden corresponder a especies de la fauna íctica o macroinvertebrados, como también a plantas acuáticas. En particular, las especies de fauna íctica corresponderán al primer criterio de selección de especies para los estudios de caudal ambiental, similar a lo definido en la Guía del SEA (2016), lo cual es debido a la importancia que poseen en la ecología acuática por su rol de animales estructuradores del ecosistema y por presentar mayores requerimientos de caudal (por lo que satisfacerían los requerimientos de otras especies como invertebrados) (SEA, 2016). Cabe señalar que dentro de la fauna íctica, tomarán relevancia aquellas especies que se encuentren con algún grado de protección y/o endemismo.

Complementariamente, parte de las AEC seleccionadas deberán dar cuenta de los servicios ecosistémicos provistos por el sistema, y en el caso en que ellos sean demasiados, podrán seleccionarse zonas donde se concentren varios servicios y/o se encuentren los más relevantes. Como criterios mínimos para la selección e inclusión de sectores en la evaluación, se deberá considerar el incluir los AEC que den cuenta de los hábitats de especies en categoría de conservación, zona del río que son utilizadas para actividades culturales y/o religiosas; y zona con uso del agua para aprovisionamiento, entre otras.

5.5 Etapa 5: Evaluación del estado de hábitat y servicios ecosistémicos en condición “natural”, definición del criterio y estimación del régimen del caudal ambiental

5.5.1 Evaluación de la condición del hábitat potencial y condición de desarrollo de servicios ecosistémicos bajo condición “natural”

La evaluación de la condición debe ser realizada mediante el desarrollo y análisis de la hidrología e hidráulica, más una evaluación de la respuesta del hábitat y de los servicios ecosistémicos (condición esperada). El requerimiento de una evaluación del hábitat es un requisito estricto de la presente guía, lo cual difiere de la Guía del SEA (SEA, 2016) en donde la aplicación de ella dependerá de la complejidad del sistema y de la evaluación del proyecto en estudio. En el caso aquí analizado, es necesario contar con una medida de la condición del sistema con la cual contrastar la condición más “natural” del sistema contra la condición actual y futura posible, y con la cual poder estimar las brechas, déficits y/o disponibilidad de recursos del sistema.

Para la hidráulica, la literatura propone diferentes enfoques y aproximaciones para el análisis, siendo ellas dependientes tanto de la profundidad requerida en el análisis como de la complejidad del problema a resolver. Esta última característica, la complejidad del sistema, siempre se asocia a la configuración del sistema analizado, y en particular, con características como la variación del caudal a lo largo del sistema, cantidad de cambios de la morfología del sistema, existencia de regulación natural del caudal en su recorrido (p.ej. existencia de reservorios), existencia de singularidades que dominen la hidráulica (p.ej. cascadas, rápidos, entre otros). Con lo anterior, se tendrán variadas formas de realizar la evaluación, las que irán desde métodos simplificados de aproximación con base física básica, hasta sofisticados métodos numéricos de evaluación y análisis.

En cuanto a la evaluación de la respuesta del hábitat y de los servicios, también existen al menos dos formas de ser realizadas, la primera de ellas dada por la evaluación de las curvas de idoneidad utilizando la información de la hidráulica, y la segunda correspondiente a una forma más sofisticada, y a través de la implementación de un modelo de simulación hábitat. Ambos métodos cuentan con la misma base para la evaluación, pero difieren en la capacidad de integración, profundización y refinamiento del resultado, teniéndose un análisis más complejo en este último caso.

A continuación, se entregan mayores antecedentes respecto de las diferentes metodologías documentadas en la literatura, entregándose también ejemplos y recomendaciones para su aplicación.

5.5.1.1 Aproximaciones y métodos para el análisis del caudal ambiental

En la literatura existen diversas propuestas metodológicas para el análisis del régimen de caudales y la determinación de un caudal ambiental del río, las cuales han sido recopiladas y definidas en estudios como los de Davis & Hirji, 2003; O’Keeffe and Le Quesne, 2009; USAID, 2017; Harwood et al., 2017. Como es de esperar, estas metodologías son parte de la propuesta incluida en la Guía del SEA (SEA, 2016), ya que ellas corresponden al estándar internacional en el tema. De entre todos los estudios, es el de O’Keeffe and Le Quesne (2009) el cual describe de mejor forma estas metodologías, las cuales son brevemente explicadas a continuación:

- Método hidrológico

Consta de mantener cierto porcentaje del caudal natural del río para proveer las componentes ambientales de interés. Por ejemplo, Richter et al (1997) describe un rango natural de variación hidrológica que, utilizando algunos índices hidrológicos, caracteriza la magnitud, tiempo de ocurrencia, duración, frecuencia o tasa de cambio que caracteriza el régimen de caudales del río. El porcentaje y régimen de caudal determinado dependerá del cada río, considerándose su ubicación, la biodiversidad presente y los intereses de los usuarios.

- Método de Extrapolación

Corresponde a la utilización de resultados de estudios de caudal ambiental existentes (en otros ríos o tramos del analizado) para modelar el comportamiento de variables ambientales en función del caudal del río. Este método proporciona un porcentaje del caudal natural recomendado, que posteriormente puede ser descompuesto en curvas de duración mensual para años normales o de sequía. Solo es posible utilizarlo en regiones en las cuales se tenga una gran cantidad de evaluaciones de caudal ambiental, de las cuales se puedan obtener los datos para realizar la interpolación.

- Método hidráulico

Este método mide cambios en el hábitat hidráulico disponible, tales como perímetro mojado, profundidad y velocidad, y está basado en una única sección transversal del río que representa la forma del canal. Esta sección transversal es considerada como un hábitat biológico, lo que permite hacer una evaluación gruesa sobre los cambios en ese hábitat producto de las variaciones de caudal. Los caudales requeridos pueden ser determinados a partir de una evaluación del hábitat disponible para ciertas especies.

- Simulación hidráulica y de hábitat

Esta metodología posee la misma base que el método hidráulico, pero con un mayor nivel de desarrollo. Se utilizan varias secciones transversales para construir un modelo hidráulico y con ello simular las condiciones en un tramo del río, considerando el perímetro mojado, profundidad y velocidad del flujo. Para considerar la idoneidad de hábitat biológico de las especies, se toman en cuenta las características hidráulicas del río donde se encuentra una determinada especie. Combinando la hidráulica y biología del sistema, es posible obtener un área de hábitat preferente disponible para cada especie en consideración, bajo distintos escenarios de caudal y poder determinar su caudal requerido. Esta metodología se basa en el concepto de la existencia de requerimiento de flujo para la mantención del sistema ("Instream Flow Criteria"), y en particular para la biota de este (Wesche y Rechart, 1980). En particular, de entre todos los métodos, el IFIM ("Instream Flow Incremental Methodology") corresponde a la metodología más extensamente utilizada, especialmente en los Estados Unidos (Navarro et al., 1994).

- Métodos holísticos

Se basan en un consenso entre especialistas en múltiples áreas del conocimiento, para determinar un caudal apropiado para proveer algunos requerimientos ambientales o describir las consecuencias de modificar el régimen del caudal del río. Generalmente participan hidrólogos o ingenieros hidráulicos para dar la información de línea base de los flujos y condiciones hidráulicas, biólogos para la fauna íctica, invertebrados y caracterización de la vegetación ripariana, además de geomorfólogos para predecir los

cambios en el transporte de sedimentos y mantención del cauce ante distintos escenarios de caudal. Por otra parte, se necesita también un especialista en calidad de aguas y un socio-economista. Existen distintas metodologías, tales como DRIFT o “Building Block”, que proveen un marco de referencia para la recopilación de información, análisis e integración de los datos, para realizar una predicción experta sobre los efectos en cambios de flujo en el río. Esta metodología ha sido ampliamente utilizada debido a su robustez y pueden ser utilizados para distintos objetivos y con distintos niveles de información disponible, considerando además la credibilidad proporcionada por la experiencia en distintas áreas de este panel de expertos.

5.5.1.2 Aplicación de metodologías al río Loa

Considerando que el río Loa corresponde a un sistema complejo, dadas tanto por sus características morfológicas como por lo dinámico y variado del caudal circulante y de sus fuentes, a continuación se entregan mayores antecedentes respecto de los métodos recomendados para la evaluación de la condición, dados por la “simulación hidráulica” y la “simulación de hábitat y evaluación de servicios ecosistémicos”

5.5.1.2.1 Simulación hidráulica

Para el análisis de la hidráulica fluvial mediante una simulación hidráulica, se recomienda la utilización del software libre HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) desarrollado por el US Army Corps of Engineers (USACE), el cual corresponde a un modelo que permite resolver de forma unidimensional el cálculo del eje hidráulico en canales con régimen permanente, y de forma bidimensional el régimen impermanente. Dentro de las principales características del modelo, es posible destacar la posibilidad de su aplicación tanto a ríos como canales en régimen subcrítico, supercrítico o régimen mixto. El enfoque base del modelo es el resolver la ecuación de energía unidimensional, considerando las fuerzas friccionales (ecuación de Manning), contracciones/expansiones y obstrucciones por elementos típicos en un río, como por ejemplo, puentes y pilas, entre otros.

En cuanto a la construcción del modelo hidráulico, la geometría del río debe ser obtenida a partir de la combinación de información de perfiles topobatimétricos levantados en terreno, en conjunto con información geomorfológica obtenida mediante el uso de los modelos de elevación digital (DEM). Para el caso del río Loa, se recomienda para una futura aplicación el uso del modelo hidráulico elaborado por el CEA en el río Loa, el cual integra información de levantamientos realizados en terreno e información contenida en DEMs de libre acceso (Figura 5.9).



Figura 5.9: Esquema de las entradas y salidas del modelo hidráulico (Elaboración propia).

La calibración del modelo hidráulico es realizada de manera iterativa y en base al ajuste de los coeficientes de rugosidad, tomando como base la información tomada en terreno para las alturas de escurrimiento y caudal circulante en un mismo instante de tiempo. De este modo, se ingresan valores del coeficiente de rugosidad de Manning (n) al modelo junto con el caudal medido en terreno, y se compara la altura de escurrimiento modelada con la medida en terreno. Este proceso se debe repetir hasta encontrar el coeficiente de Manning que minimiza la diferencia. Otra alternativa para determinar los valores del coeficiente de rugosidad de Manning es la caracterización del lecho mediante fotointerpretación o análisis granulométrico, lo cual permite realizar un ajuste más rápido y preciso.

Para analizar el comportamiento del modelo del río bajo determinados caudales, se debe realizar un estudio hidrológico con la información disponible en las estaciones fluviométricas asociadas (o relacionadas) al río. Así, será posible determinar cuál distribución probabilística es la que mejor se ajusta a cada una de las series de caudales temporales de las estaciones fluviométricas de interés. Con el resultado anterior, se obtendrá una serie de caudales con distinta probabilidad de excedencia, las cuales serán utilizadas como input al modelo hidráulico. Del mismo modo, se obtendrán las curvas de duración y de variación estacional de cada tramo de interés.

El ancho superficial de escurrimiento en las secciones será desde los resultados de la modelación con HEC-RAS, para los distintos caudales en estudio. Para las velocidades máxima y media de la corriente, ellas se obtendrán de elegir la configuración de distribución de flujo en el modelo de régimen permanente, seleccionando una cantidad “N” de subsecciones equi-espaciadas en los distintos perfiles transversales a modelar. Así, se obtendrá una velocidad máxima dentro del perfil, y la velocidad media al realizar la media aritmética de las velocidades de las distintas subsecciones consideradas.

A partir del desarrollo anterior, se obtendrá una completa caracterización hidráulica del río en los tramos estudiados (zonas de interés), obteniendo una caracterización del ancho superficial del cauce, la curva de caudal, y las velocidades medias y máximas, bajo las diferentes condiciones de caudal pasante. Adicionalmente se obtendrá el perfil hidráulico longitudinal del río, el cual es utilizando como input en el modelo de hábitat, y el cual corresponde a la base para la determinación de los caudales ambientales.

5.5.1.2.2 Simulación de hábitat y desarrollo de servicios ecosistémicos

El modelo de hábitat permite simular y estimar el tamaño del hábitat disponible para diferentes especies de la biota, bajo todas las condiciones hidrológicas e hidráulicas obtenidas mediante el modelo de simulación hidráulica. Junto con la simulación de especies biológicas específicas, como parte de la simulación será posible construir aproximaciones de los servicios ecosistémicos identificados, asemejando su desarrollo al de la biota mediante la representación de su relación con las variables hidráulicas. Algunos ejemplos de ellos podrán ser la evaluación de los requerimientos de la pesca o el baño recreacional, ambos traducibles a condiciones del flujo (altura y velocidad de este) necesarias para su desarrollo adecuado. Así, los resultados del modelo hidráulico aportarán la base para su evaluación, utilizando las variables hidráulicas de profundidad y velocidad de escurrimiento asociadas a los caudales pasantes, como base de evaluación.

Para realizar la simulación de hábitat, se debe contar con información referente a la fauna acuática presente en el río, y poder con ello determinar la o las especies objetivo a utilizar

para la evaluación del modelo de hábitat. La selección de las especies a considerar como parte de la simulación son las definidas como parte de la conceptualización y definición de los ecosistemas potenciales (sección 5.4). Cabe señalar que esa conceptualización podrá generar un gran número de especies potenciales a desarrollarse en los diferentes ecosistemas, por lo que para lograr una evaluación de un número “razonable” de especies, se podrán seleccionar un subgrupo que privilegie las especies nativas y las que estén con algún grado de categoría de conservación. En el caso de los servicios ecosistémicos prestados por el río, de ellos se deberá privilegiar a aquellos que cuente con un mayor valor social.

Una vez seleccionadas las especies y servicios ecosistémicos objetivo para cada una de las AEC, para el análisis de la biota que se desarrolla en el río se deben construir las curvas de habitabilidad o idoneidad (desarrollado más adelante), las cuales serán construidas en base a la literatura, juicio experto colectivo y ajustadas a la realidad del sistema analizado a partir de la información de campo (Bovee, 1986). Para lo anterior, se debe tener en cuenta que la condición actual de muchos ríos de nuestro país corresponde a una condición alterada, y que además es posible coincidir con una temporada del tipo año seco durante el levantamiento de información, con lo que los datos de campo podrán dar cuenta de una condición muy deprimida del sistema. Por ello, la información de campo debe considerarse como complementaria, y no siempre (o casi nunca) dará cuenta de la condición “natural” promedio del sistema, por lo que los análisis de habitabilidad deberán ser conducidos en base al conocimiento científico y literatura, con un posterior ajuste a las características del sistema mediante el conocimiento y juicio experto de especialistas en el tema. En el caso de los servicios ecosistémicos, se deben construir las curvas de idoneidad en función de cada servicio, según encuesta a los usuarios e identificando las condiciones hidráulicas necesarias para el desarrollo del servicio.

Con esta información, se confeccionará el modelo de hábitat, para lo cual se propone usar el software PHABSIM (USGS, 2001). Este modelo utiliza la información de la hidráulica junto con las curvas de idoneidad para obtener curvas de Hábitat Ponderado Útil (HPU) versus caudal, para cada una de las especies o servicios ecosistémicos considerados. De esta forma, se obtendrán los caudales óptimos para cada especie o servicio ecosistémico.

PHABSIM está basado en el supuesto de que las especies acuáticas, y cualquier otro servicio que se puede ser representado como la necesidad del espacio físico generado en la columna de agua del río, están limitados por la disponibilidad del hábitat físico, es decir, por las condiciones hidráulicas como altura y velocidad generadas por el caudal pasante. Así, el modelo realiza una combinación y cruce de la información de la preferencia de las especies acuáticas (curvas de idoneidad) con la información hidráulica para distintos caudales, generando como respuesta el comportamiento que tendrá la especie ante distintas condiciones hidrológicas.

En el caso que se pueda construir una curva de idoneidad para el desarrollo de un servicio ecosistémico cualquiera, en función de las características hidráulicas del río, se considerará de la misma manera que el hábitat de especies, donde su curva de preferencia se podrá evaluar con la simulación de hábitat. Por ello, se describe la metodología de simulación de hábitat como si todos los servicios fueran representados como una especie, incluyendo así todos servicios ecosistémicos en general en la modelación.

Para la simulación se utiliza el módulo HABTAE, correspondiente al principal módulo de hábitat de PHABSIM (USGS, 2001), siendo este módulo el que ha mostrado una mayor

versatilidad en términos del análisis de la velocidad de la corriente en las simulaciones de hábitat.

La modelación de hábitat debe realizarse en subtramos, ellos escogidos dentro de las AEC, y los que corresponderán a tramos representativos del área a proteger. A diferencia de la modelación hidráulica, se deberá modelar por separado cada subtramo de AEC, para obtener así el hábitat ponderado útil para cada una de ellas.

Los subtramos modelados serán representados en el modelo de hábitat mediante los resultados de la modelación hidráulica y la geometría de las secciones transversales. Con esta información, cada subtramo de AEC es conceptualizado por el modelo de hábitat como un agregado de celdas, en cada una de las cuales se conoce la profundidad, la velocidad del escurrimiento y el sustrato (Figura 5.10).

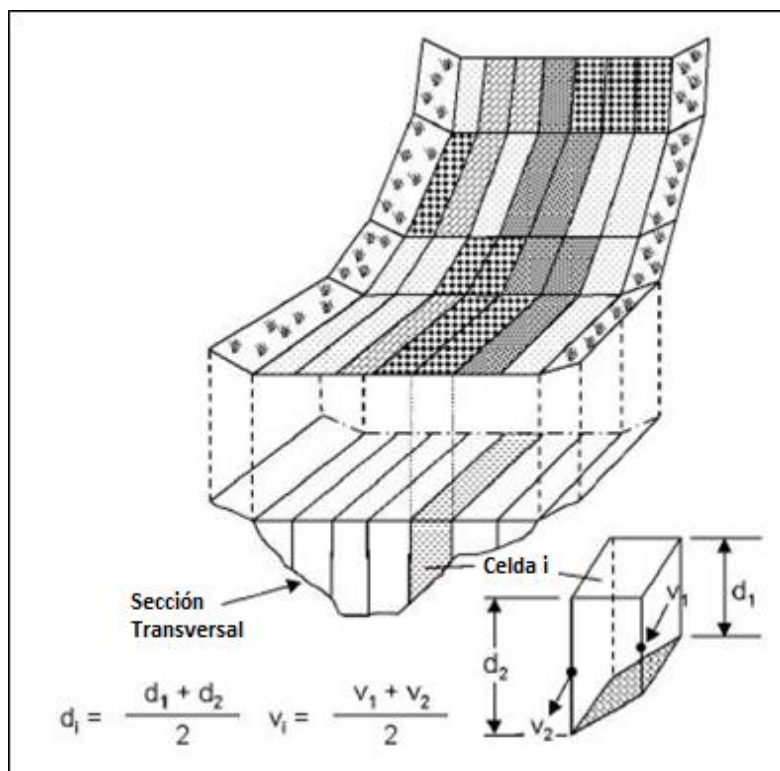


Figura 5.10: Conceptualización de un tramo de río en PHABSIM (Fuente: USGS, 2001).

El esquema de la Figura 5.11 muestra los pasos seguidos en PHABSIM para la realización de una simulación. En primer lugar, serán ingresados los datos de la geometría de la sección junto con datos del resultado entregados por el modelo hidráulico para una caudal seleccionado. Este caudal será denominado como caudal de calibración, y el cual permitirá en la calibración del perfil de velocidades en la sección. El input de calibración corresponderá a información de las subsecciones transversales del río consideradas, compuesto por la altura y velocidad del flujo para el caudal de calibración. Con lo anterior, el modelo PHABSIM será capaz de estimar el perfil de velocidades bajo otras condiciones de caudal. Este input al modelo, dado por el caudal, la altura y la velocidad de flujo en cada subsección, es generado mediante la interpolación de los datos y resultados del modelo

hidráulico. Adicionalmente, se ingresarán los caudales de simulación (todo el rango a evaluar) y las curvas de habitabilidad a utilizar para cada especie objetivo.



Figura 5.11: Esquema de módulos a ejecutar en PHABSIM.

5.5.1.2.2.1 Desarrollo de curvas de idoneidad

Las curvas de idoneidad de hábitat requeridas para la simulación, se deben construir utilizando las variables relevantes del sistema, y que tengan algún grado de relevancia en el desarrollo de las especies o servicio ecosistémico. En cuanto a la condición hidráulica, las variables velocidad y profundidad del escurrimiento han sido reconocidas como las más relevantes para las especies que dependen de los ríos (especies objetivo) y son ampliamente utilizadas. En el caso de otras variables relevantes, ellas deberán ser estudiadas de forma complementaria y aplicadas mediante el cruce de información paralelo al desarrollo de una simulación de hábitat como la de PHABSIM. En el caso del río Loa, se reconoce como variable relevante complementaria a la salinidad (DGA-CEA, 2008), la cual es caracterizada de forma aproximada para el sistema en su recorrido mediante una aproximación teórica dependiente del caudal y recorrido, y la cual es cruzada contra los umbrales de tolerancia de salinidad de las especies (sección 5.3.1) del sistema (Nielsen et al, 2003).

La construcción de las curvas se realizará mediante información indirecta, como lo es la literatura científica y estudios locales, junto con el uso del juicio experto de especialistas en el tema. Las curvas conceptualizadas serán ajustadas a la realidad del sistema mediante el análisis de la información local recolectada y otra posible de haber sido levantada en terreno para este fin. Cabe señalar que esta información debe ser utilizada considerando que ella no siempre representará la condición “natural” media del sistema, y puede representar una condición muy alejada de ella.

En términos hidráulicos, se identificarán secciones transversales dentro de la geometría definida en el modelo hidráulico, correspondientes a puntos de control donde se esperaría la presencia de las especies en estudio, junto con otros definidos en zonas donde existan

avistamientos documentados. Luego, para cada una de ellas se obtendrán las alturas de escurrimiento resultante de evaluar el rango de caudales asociados a la sección, para luego dividir el perímetro mojado en 50 secciones equiespaciadas, de las cuales se obtiene un valor de altura y velocidad al evaluar la ecuación de Manning (Mery, 2013):

$$V_{seccion} = \sum V_i = \sum \left(\frac{\sqrt{s} A_i^{\frac{2}{3}}}{n_i \chi_i^{\frac{2}{3}}} \right)$$

Donde V_i corresponde a la velocidad, s al valor de pendiente topográfica del fondo del canal-río, n_i al coeficiente de rugosidad de Manning, A_i al área y χ_i al perímetro mojado. El subíndice i da cuenta de la banda i -ésima considerada.

Estos valores de altura y velocidad resultantes se considerarán que son representativos de las condiciones/características del hábitat de la especie en estudio para cada condición de caudal considerada, con lo que se podrá generar un análisis de frecuencia para todos los valores obtenidos por especie y para los distintos caudales. En función de cada parámetro (velocidad y profundidad) se generará una curva con la preferencia evaluada entre 0 y 1.

A continuación, en la Figura 5.12 se muestra un ejemplo de las curvas de idoneidad de una especie específica en dos etapas de vida, en función de la velocidad del cauce, diferenciándose así la preferencia de la condición de hábitat para los estados de adulto y juvenil.

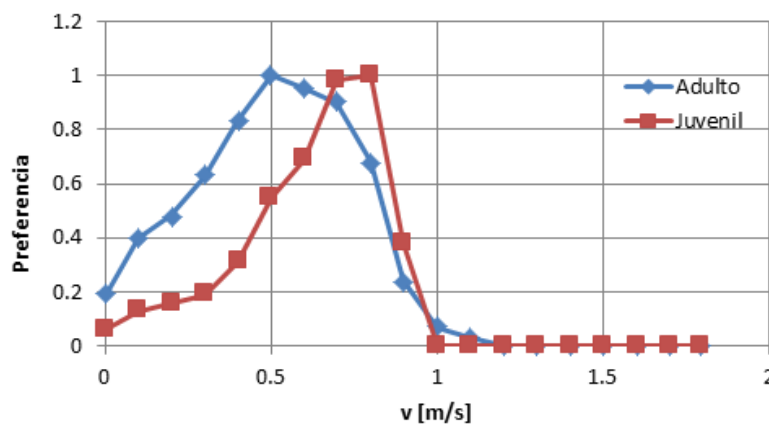


Figura 5.12 Ejemplo de curvas de idoneidad para velocidad del flujo en el cauce (Fuente: Elaboración propia).

5.5.1.2.2.2 Módulos WSL y VELSIM

Para utilizar el módulo de hábitat de PHABSIM, es necesario previamente que el programa procese las características hidráulicas del subtramo analizado. Para esto, primero debe ser ejecutar el modelo WSL, el cual utiliza como input las alturas de escurrimiento (profundidades) obtenidas en HEC-RAS para cada uno de las caudales de simulación.

Posteriormente, se utiliza el módulo de velocidad VELSIM (USGS, 2001) para el procesamiento de las velocidades de escurrimiento. Para ello se utiliza la distribución de

velocidades en el cauce, discretizada como celdas de subdivisión horizontal del flujo (Figura 5.10). A partir de la distribución de velocidades del caudal de calibración, el programa calcula la distribución de velocidades por sección y para cada uno de los caudales de simulación.

5.5.1.2.2.3 Módulo HABTAE

Una vez ejecutados los módulos hidráulicos de PHABSIM (WSL y VELSIM) antes descritos, el modelo contará con los inputs necesarios de velocidad y altura de escurrimiento por celda, pudiéndose ejecutar el módulo de hábitat HABTAE. Este módulo del programa realiza un cruce de las condiciones del flujo y las curvas de idoneidad de cada especie o servicio ecosistémico.

Así, el resultado para un determinado caudal, será la habitabilidad combinada de una celda, y con ella el valor del HPU (Hábitat Ponderado Útil):

$$C_i = V_i \cdot H_i \cdot S_i$$

$$HPU = \sum_i^n A_i \cdot C_i$$

donde:

C_i : Habitabilidad combinada de la celda i (compuesta por velocidad V , profundidad H , y sustrato S).

A_i : Área vertical de la celda.

La ponderación de los valores de preferencia de hábitat por el área de la celda, permite obtener el valor del HPU de dicha celda. Posteriormente, la suma de los HPU de todas las celdas de una sección permite obtener el HPU total de dicha área para el caudal modelado (Q). Así, repitiendo el procedimiento para distintos caudales, se obtiene la curva HPU vs Q .

Cada una de las AEC será modelada para una serie de caudales asociada a distintas probabilidades de excedencia, las que son calculadas a partir de la serie histórica de caudales. Además, en esta etapa podrán ser considerados escenarios futuros de la hidrología, y con lo cual poder realizar aproximaciones a la condición futura del sistema. Ejemplos de condiciones futuras corresponden a los escenarios de cambio climático u otros escenarios donde el caudal varíe respecto de la condición actual e histórica.

5.5.1.2.2.4 Servicios ecosistémicos sin curvas de idoneidad

Como fue mencionado anteriormente, podrán existir servicios ecosistémicos en los cuales no existe una preferencia explícita que permita la elaboración de curvas de idoneidad, como en el caso de la biota que habita el río y según lo descrito en el punto 5.5.1.2.2.1. En estos casos se deberá reconocer los requerimientos mínimos de la actividad o servicios, respecto de las condiciones hidráulicas del río para su realización o desarrollo, como lo son el caudal, la altura de escurrimiento (profundidad), la velocidad, el ancho del cauce, entre otras. A modo de referencia, en la Tabla 5-6 se muestran algunas limitaciones hidráulicas aplicadas a algunas actividades antrópicas que se desarrollan en y entorno a los ríos, y cuyos valores pueden ser usados como referencia.

Tabla 5-6: Variables hidráulicas y rango crítico para la realización de las actividades antrópicas in situ (Fuente: DGA-CEA, 2008).

Actividades Antrópicas	Valores críticos (mínimos y máximos)		Bibliografía
	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)	
Kayak	$P_{\min}: 0,1-0,2^A$	$V_{\max}: 4,5^D$	A : Gordon et al. (2004) B : Rood y Tymensen (2001) C : Rood et al. (2003) D : Mosley (1983)
Canoa	$P_{\min}: 0,6^{B,C}$	$V_{\max}: 4,5^D$	
Rafting	$P_{\min}: 0,2^D$	$V_{\max}: 4,5^D$	
Remar/vadear	$P_{\max}: 1.2^D$	$V_{\max}: 1.8^D$	
Pesca por vadeo	$P_{\max}: 1.2^D$	$V_{\max}: 1.8^D$	
Nado	$P_{\min}: 0.8^D$	$V_{\max}: 1.0^D$	
Buceo	$P_{\min}: 0.3^D$	$V_{\max}: 2.0^D$	
Pesca (bote)	$P_{\min}: 0.3^D$	$V_{\max}: 3.0^D$	
Bote (sin motor)	$P_{\min}: 0.5^D$	$V_{\max}: 1.5^D$	
Bote a vela	$P_{\min}: 0.8^D$	$V_{\max}: 0.5^D$	
Botes a motor (bajo poder)	$P_{\min}: 0.6^D$	$V_{\max}: 3.0^D$	
Botes a motor (alto poder)	$P_{\min}: 1.5^D$	$V_{\max}: 4.5^D$	
Lancha (jetboating)	$P_{\min}: 0.1^D$	$V_{\max}: 4.5^D$	

Así, los parámetros hidráulicos de profundidad y velocidad del flujo en el cauce pueden ser ingresados al modelo hidráulico en los distintos tramos e iterativamente puede determinarse el caudal crítico asociado a cada servicio ecosistémico.

5.5.2 Definición del criterio para el caudal ambiental respecto de la condición “natural”

Para la estimación de un caudal ambiental se hace necesario establecer los criterios para la mantención del hábitat y de los servicios del río, y el cual deberá resguardar la integridad ecológica y biodiversidad en los ecosistemas, junto con asegurar de la mejor forma posible el desarrollo de los servicios ecosistémicos más relevantes. Como fue indicado anteriormente, el caudal ambiental estará compuesto por diferentes partes, donde cada una de ellas intenta representar un paquete de requerimientos al sistema fluvial. Así por ejemplo, la “Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional” (USAID de sus siglas en inglés) considera al menos 2 componentes principales, dadas por una Componente 1 de “caudal de supervivencia” y la otra (Componente 2) dada por la suma de los “Requerimientos sociales y ecológicos mínimos” al sistema (Figura 4.7). La tercera componente indicada da cuenta de caudales para suplir las necesidades de mantención del sistema fluvial principalmente.

Así, es posible ver de la definición del USAID (2017) que el criterio utilizado buscará una priorización clara de la protección de la ecología del sistema en última instancia. Este tipo de lineamientos para la definición del criterio a implementar es uno entre muchos, teniéndose otras formas que priorizarán el sostenimiento de uno o más servicios ecosistémicos críticos por sobre la ecología y biodiversidad del río.

En el caso del río Loa, los criterios para la definición podrán ser variados, dependiendo siempre del interés de la comunidad y los tomadores de decisiones. Así, se debe señalar que este río cuenta con características y condiciones particulares, las que se deberán tomar en cuenta y sopesar para la definición del criterio. Algunas de estas características se indican a continuación, para luego realizar una recomendación respecto de un orden para la priorización y construcción del criterio.

- El río se muestra como un sistema que de forma natural es muy variable en su caudal, e inclusive intermitente en su recorrido, con lo que una definición de un caudal de supervivencia fijo no pareciera ser posible de implementar.
- Por su longitud (la mayor de los ríos del país), gran diferencia altitudinal existente en su recorrido, y condiciones de entorno desértico, el río cuenta con diferencias bien marcadas entre sus diferentes tramos o sectores, lo cual es más evidente en variables secundarias, como lo es con la salinidad del agua.
- El río sostiene gran parte de las comunidades de la región de Antofagasta, las que ocupan los territorios cercanos al río y oasis que este logra generar, por lo que la existencia de ellas y su desarrollo, está supeditado al uso del río y su recurso.

Así, el río no solamente se presenta como un sistema que posibilita el desarrollo de ecosistemas para el desarrollo de la biota, sino que provee servicios que son fundamentales para el desarrollo de las comunidades y población de la región. Entre estos últimos, podremos reconocer cuatro tipos de requerimientos que estarán moldeados en base a los criterios considerados para el caudal ambiental. Ellos están dados por “Requerimientos ecológicos”, “Requerimientos sociales”, “Definición de servicios relevantes para usuarios” y la “Definición de servicios relevantes para el desarrollo” y se muestran en la Figura 5.13.

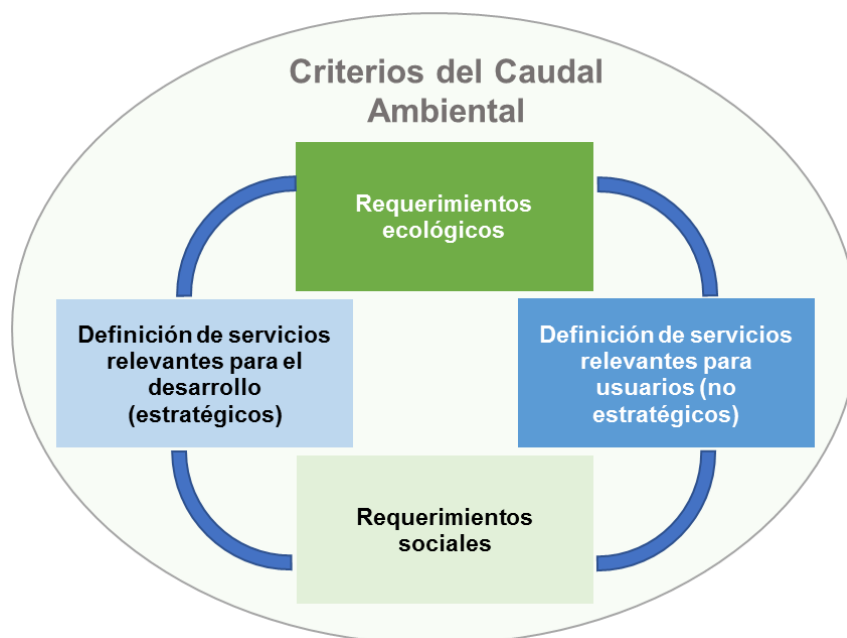


Figura 5.13. Requerimientos de caudal que componen el régimen de caudal ambiental en base a los criterios establecidos (Fuente: Elaboración propia).

Así, se considera que la suma de cada uno de estos requerimientos de caudal dará cuenta del régimen de caudal ambiental, pero esta adición de caudales deberá contar también con una priorización de ellos, basada también en los criterios de la definición.

Para poder explicar de mejor manera los servicios que componen cada requerimiento, en la Figura 5.14 se muestran parte de los usos y recursos necesarios en cada una de las categorías de requerimientos indicados. Es posible notar que los “Requerimientos sociales” dan cuenta de (abordan) las necesidades más básicas para el desarrollo y mantención de las comunidades de la región. Los “Requerimientos ecológicos” buscan mantener la condición del sistema, y con ello, mantener la ecología y biodiversidad de este. Esto último, no solamente permite sostener a la biota, sino que se debe tomar en cuenta la existencia de otros servicios que dependerán de ella para ser provisto, como los son los de tipo recreacional, de pesca, atracción turística y turismo, entre otros. Las otras dos categorías corresponden a aquellas asociadas a servicios ecosistémicos derivados (segundo orden), los que en general, utilizan recursos no fundamentales para la mantención del sistema. De entre ellas, se realiza una diferenciación de los servicios en dos categorías, dadas por “estratégicos” y “no estratégicos”. Esta separación se debe a la necesidad de priorizar, junto con considerar que en el caso de río Loa, gran parte del desarrollo de la Región depende de sus recursos.

Como parte de esta guía, y considerando las descripciones de cada categoría de la Figura 5.14, se entrega una propuesta para la priorización de los requerimientos, planteando un ordenamiento de las componentes como se muestra en la Figura 5.15. El ordenamiento de los requerimientos es necesario considerando que el régimen de caudal del río (hidrología) contará con periodos en los cuales, de forma natural, el caudal pasante puede ser menor al caudal ambiental. Así, a mayor disponibilidad de recursos (hacia la derecha en Figura 5.15), se podrá satisfacer cada uno de los requerimientos al sistema. Por el contrario, cuando la disponibilidad se reduzca (hacia la izquierda en Figura 5.15), se lograrán satisfacer las necesidades más relevantes solamente. Cabe señalar que la propuesta de ordenamiento de la Figura 5.15, es realizada considerando el caso del río Loa, el cual corresponde a un motor fundamental en el desarrollo y supervivencia de las comunidades locales por lo que se elevan los “Requerimientos sociales” como los más relevantes.

En cuanto a la definición y utilización de criterios para la definición, como fue indicado antes, ellos corresponderán a los establecidos entre los usuarios del río y la autoridad regional, y los cuales podrán ser incorporados a las categorías propuestas anteriormente. Así, los conceptos anteriores y la propuesta para la clasificación y priorización de las diferentes categorías, permiten que los usuarios de la guía cuenten con un punto de partida para la unificación de las necesidades y requerimientos de los usuarios, es decir, contar con un criterio común para el uso del recurso.



Figura 5.14. Servicios y recursos que forman cada componente de los requerimientos del caudal ambiental (Fuente: Elaboración propia).

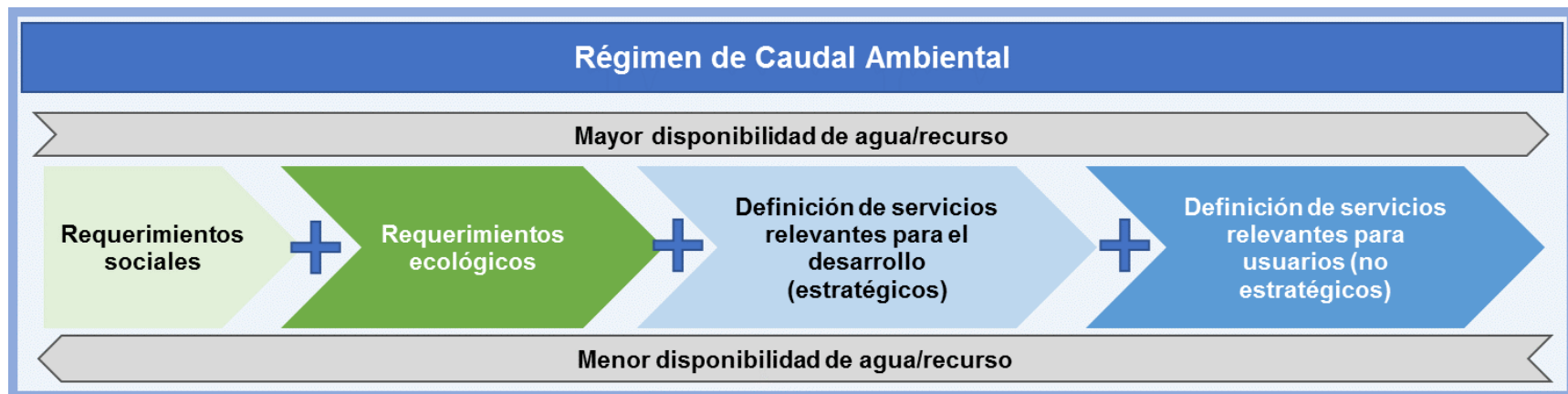


Figura 5.15. Ordenamiento de los caudales que componen el régimen de caudal ambiental (Fuente: Elaboración propia).

5.5.3 Estimación del régimen de caudal ambiental.

En la Figura 5.16 se entrega un ejemplo de las series de tiempo de valores mensuales de caudal para cada una de las 4 categorías de requerimientos ambientales. Las series muestran como los requerimientos tanto de tipo “social” como de “desarrollo” tenderán a ser más bien constantes a lo largo del año, lo cual se debe al carácter de ellos, donde ellos representan necesidades permanentes y acotadas (asociadas a procesos o necesidades concretas y cuantificables). Aun así, ellos podrán contar con variaciones intra-anales, siempre dependientes de los tipos de requerimientos que sean incluidos en cada categoría. Por otra parte, los requerimientos de tipo “ecológicos” contarán, en la gran mayoría de los casos, con variaciones a nivel mensual, las que se asocian a las etapas de desarrollo de la biota del sistema y de cada tramo. Finalmente, para los requerimientos de tipo “usuarios” se esperaría contar con variaciones intra-anales, asociadas a requerimientos de las actividades que ellos realizan (necesitan) por temporada.

Cabe recordar como parte del proceso de la determinación del régimen de caudal ambiental del río, primeramente, se determinarán los requerimientos y regímenes por cada tramo, como en la Figura 5.16, para luego realizar una integración de los requerimientos en todo el río. Esto último se deberá realizar considerando las dependencias entre tramos (requerimientos hacia aguas arriba) y la capacidad de que los requerimientos consuntivos de un tramo puedan suplir los requerimientos no consuntivos aguas arriba. Esto se explicará en mayor detalle más adelante en la guía.

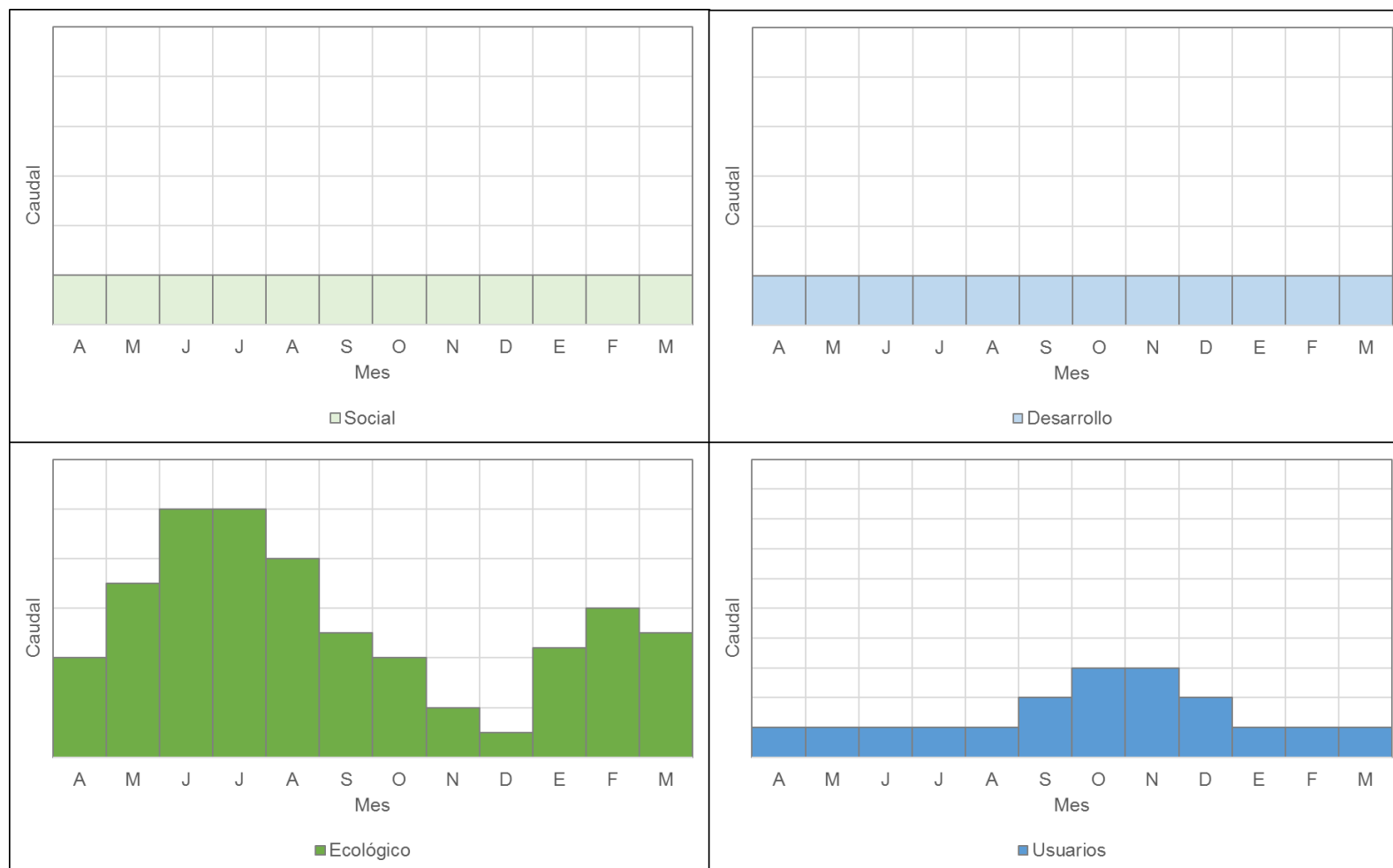


Figura 5.16. Ejemplos de series de caudales mensuales según requerimientos en régimen de caudal ambiental (Fuente: Elaboración propia).

De la suma de las 4 categorías de requerimientos (Figura 5.16) se obtiene el régimen de caudal ambiental del río, el cual es representado más adelante en la Figura 5.18.

En cuanto la comparación entre los diferentes caudales definidos (principalmente natural, actual y ambiental), la Figura 5.17 muestra las diferentes posibles configuraciones del caudal actual comparado con el caudal ambiental y el caudal natural. Donde se reconocen tres rangos principales:

- Caudal actual mayor o igual que el caudal natural, denominada condición de Exceso.
- Caudal actual menor que el caudal natural, y mayor o igual que el caudal ambiental, denominada condición Suficiente.
- Caudal actual menor que el caudal ambiental, denominada condición Insuficiente.

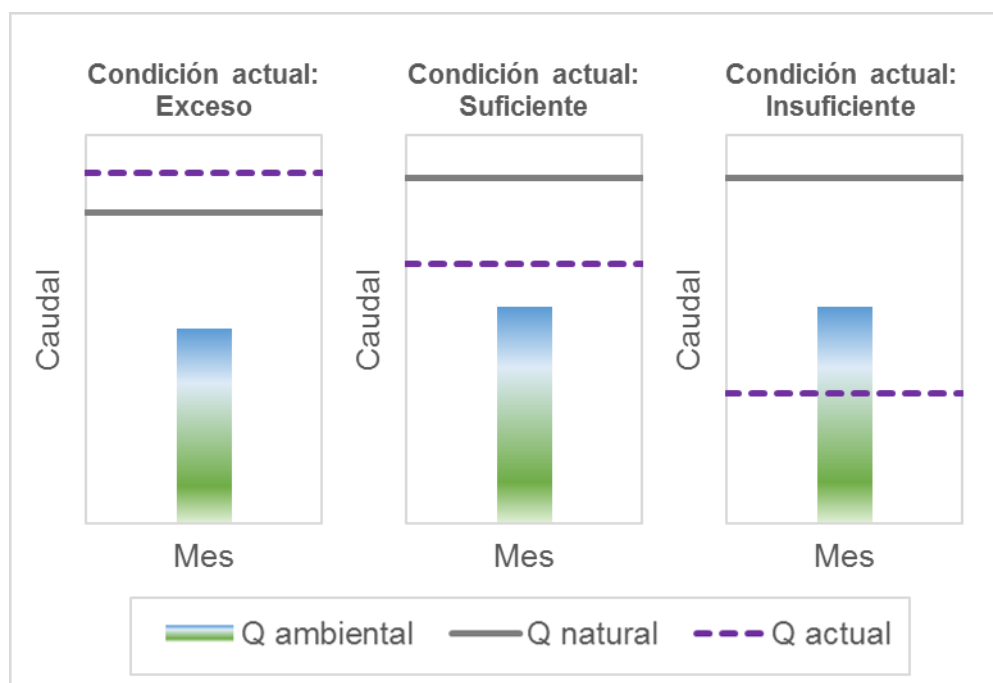


Figura 5.17. Configuraciones posibles del caudal actual comparado con el caudal ambiental y el caudal natural (Fuente: Elaboración propia).

Estas configuraciones pueden darse de manera independiente entre distintos meses, siendo posible tener una o más configuraciones dentro de un mismo año. Tomando como referencia la cuenca del Río Loa, las configuraciones más representativas corresponderían a la segunda y tercera de ellas (condición Suficiente o Insuficiente). Ello se debe a que el sistema cuenta con bastantes extracciones y usos, por lo que es probable que se tenga un caudal actual por debajo o cercano al caudal ambiental. Por lo anterior, en la Figura 5.18 se consideran estos dos tipos de configuración para ejemplificar una condición del caudal actual.

En la Figura 5.18 se observa que los requerimientos de caudal ambiental a nivel mensual, dan cuenta de las variaciones en los requerimientos, pudiéndose tener un margen mayor o menor entre él y el caudal disponible (representado por el caudal con Probabilidad de excedencia de 50%).

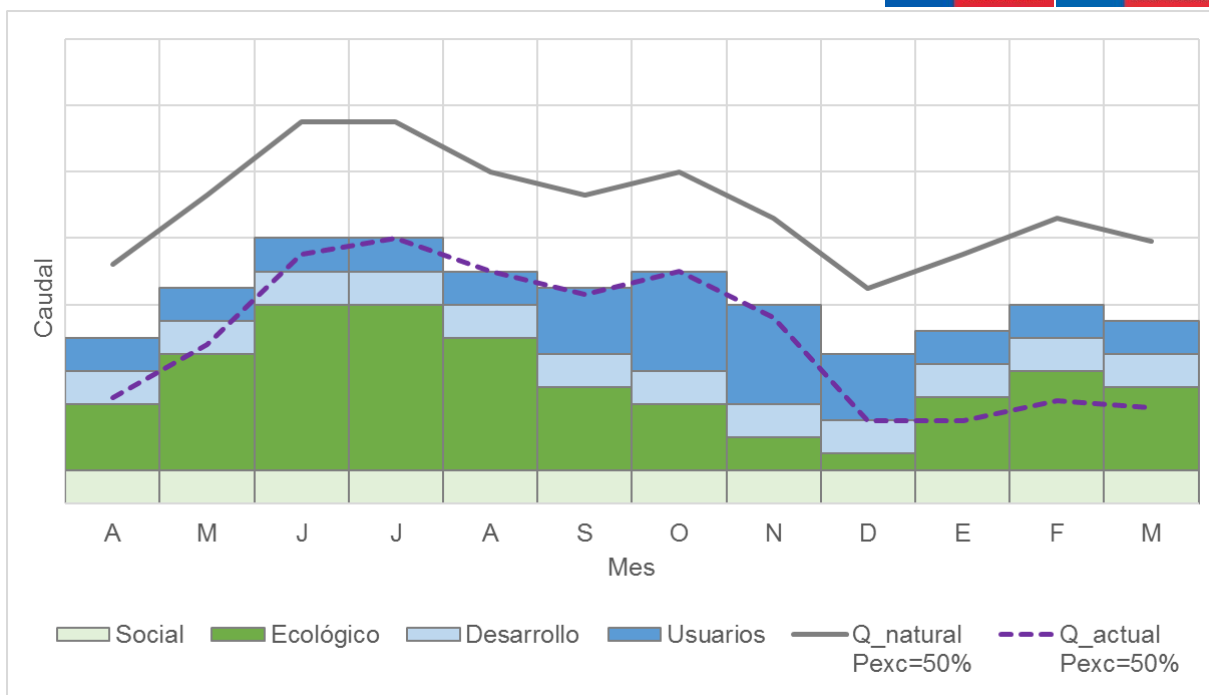


Figura 5.18. Ejemplo de serie de caudal mensual total según requerimientos de caudal ambiental. En gris se muestra como referencia el caudal natural del río asociado a la probabilidad de excedencia 50%, comprendido como la condición media “natural” Además, en línea segmentada morada se esquematiza el caudal actual asociado a la probabilidad de excedencia 50%, comprendido como la condición media “actual” (Fuente: Elaboración propia).

5.5.4 Consideraciones sobre la interpretación del régimen de caudal ambiental definido.

El análisis de caudal ambiental dará cuenta no solo de los caudales necesarios en el río, sino que además incluirá cantidades de agua a ser extraída en cada tramo con otros fines, como lo son los requerimientos de tipo “Social” o de “Desarrollo”. Es por ello que tras la definición de requerimientos en cada uno de los subtramos de río, se hace necesario el análisis integral del sistema, el cual permita dar cuenta de los requerimientos de zonas ubicadas aguas abajo de las zonas más altas. Así también, dado que podrán existir aportes intermedios al río entre los subtramos, dados por afloramientos locales o el afluente de quebradas al cauce del río en análisis, la integración podrá incluir estas particularidades y evidenciar la dependencia total o parcial de un requerimiento aguas abajo sobre el caudal de la zona aguas arriba. Como se observa, la integración y aplicación del caudal ambiental podrá ser tan compleja como la configuración y dinámica del sistema.

Es por lo anterior que, a continuación, se entregan algunas consideraciones y recomendaciones sobre la definición del caudal ambiental según las condiciones aguas arriba, mostrándose un ejemplo para cada caso.

Al definir el caudal ambiental, se debe tener en cuenta sobre los requerimientos:

- Los requerimientos sociales son específicos de cada tramo, y podrán ser enterados de forma completa por el caudal proveniente desde el tramo aguas arriba, o por una combinación de ese con algún aporte local. En el primero de los casos, la componente Social del tramo aguas arriba deberá contener completamente los requerimientos de los ubicados aguas abajo. En el segundo de los casos, una buena práctica es asumir una proporcionalidad de la entrega del recurso, con lo que el tramo aguas arriba se asumirá como proveedor (la componente Social deberá contener) de una parte del requerimiento, dada por la proporción entre el caudal medio del tramo aguas arriba y el del aporte intermedio. Así, nuevamente desde aguas arriba se deberá asegurar parte del requerimiento Social de aguas abajo.

En la Figura 5.19 se muestra un ejemplo de la dependencia hacia aguas arriba de los requerimientos sociales del sistema, y de cómo deberán ser integrados los caudales ambientales definidos en los diferentes tramos como parte del análisis integral del sistema.

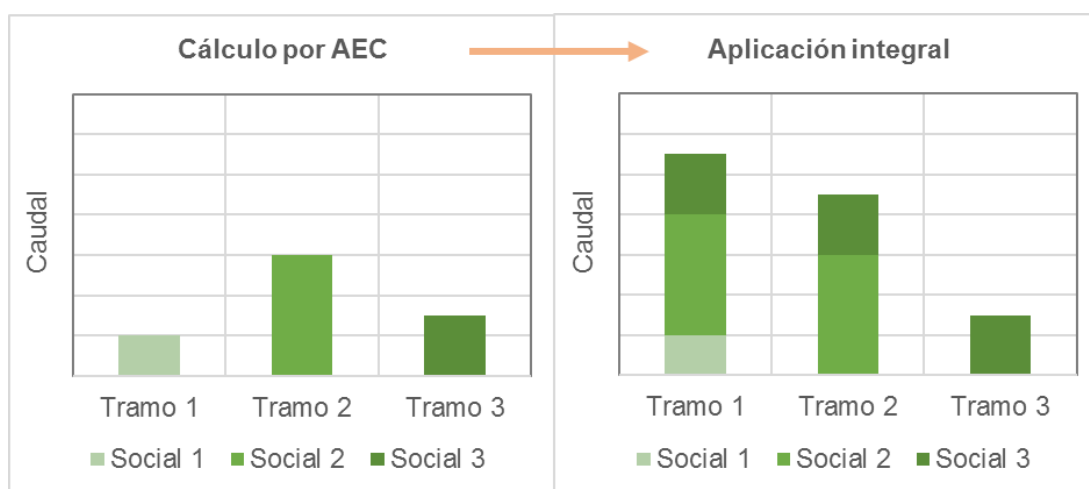


Figura 5.19. Representación del régimen de caudal ambiental en los 3 tramos definidos y hacia aguas abajo. El color de cada parte de las barras, representan los requerimientos del caudal ambiental (Fuente: Elaboración propia).

- Los requerimientos ecológicos, en general, corresponden a una necesidad de caudal en el río, es decir, una cantidad de agua pasante que permita ciertas condiciones de la hidráulica (no consuntivo). Por lo mismo, esta cantidad es tramo específico, y no generaría extracción/reducciones del caudal en el tramo evaluado. Así, el análisis podrá considerar que los requerimientos de consumo existentes aguas (de tipo social o productivos) pueden cumplir/suplir este requerimiento en un tramo aguas arriba, siempre y cuando se asegure el completo traspaso de esta cantidad hacia aguas abajo. A continuación se entrega un ejemplo de la aplicación de lo anterior.

En la Figura 5.20 se muestran la diferencia existente entre el Inicio y Fin de un tramo en términos del requerimiento Social, teniéndose que el requerimiento es completo en la zona inicial y nulo al final del tramo. Además, se muestran los requerimientos ecológicos de cada tramo, el cual no cuenta con el mismo comportamiento, por corresponder ellos a caudales pasantes en todo el tramo.

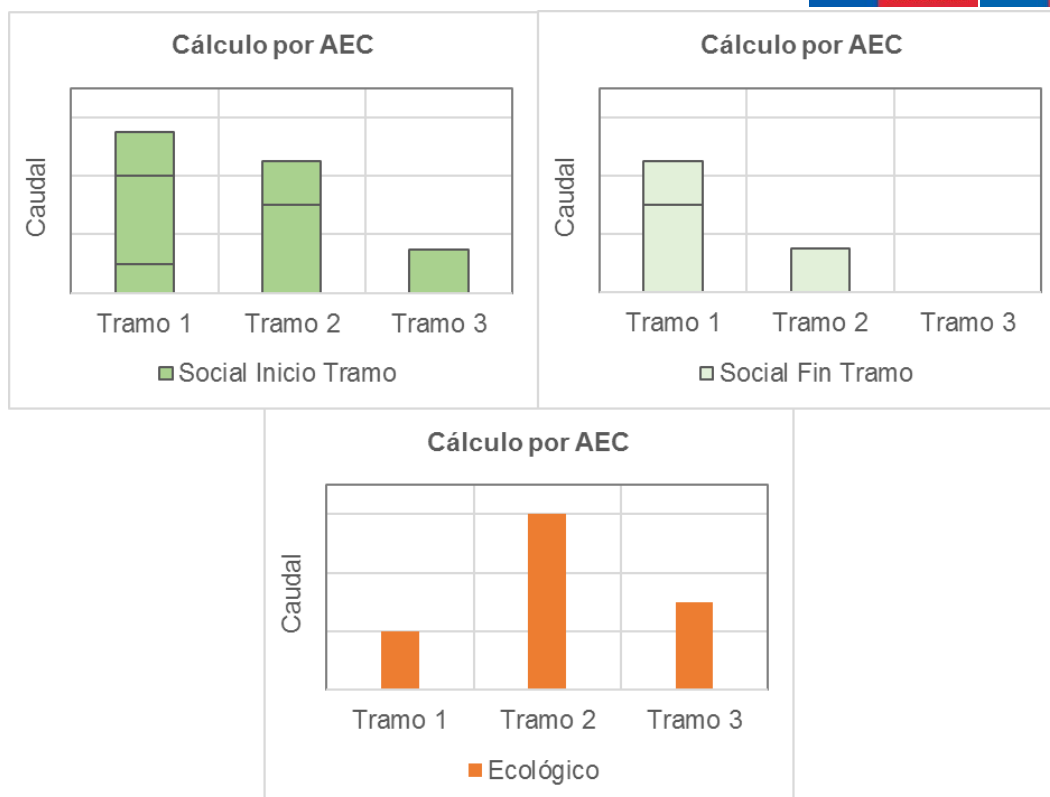


Figura 5.20. Representación del requerimiento Social en un sistema de 3 tramos, considerando el Inicio y Fin de cada uno de ellos. Se observa como el requerimiento es de tipo consuntivo, por lo que al final de cada tramo el requerimiento será nulo. Se muestra el requerimiento Ecológico asociado a cada tramo, el cual es de carácter no consuntivo, y por lo que será igual en todo el tramo (Fuente: Elaboración propia).

Al evaluar la posibilidad de que los requerimientos Sociales en un tramo puedan a su vez suplir el Ecológico, podrá generar una confusión por la relación que existirá entre los diferentes requerimientos, por lo que a continuación se muestran ambos escenarios posibles al considerar los requerimientos de tipo Social al Inicio o Final del tramo.

En la representación de la Figura 5.21 se observa que hacia el Fin del tramo, la componente Social podrá suplir en menor medida los requerimientos Ecológicos, con lo que aun cuando al inicio se tenga una mejor condición, sería necesario asegurar el caudal diferencial entre ambos para la condición al Fin del tramo. De forma gráfica, sería necesario asegurar los caudales diferenciales (respecto del Social disponible) por concepto Ecológico (en azul) mostrados en la Figura 5.22. Así, la porción naranja del requerimiento Ecológico (Figura 5.22) podrá ser cubierta por el caudal Social pasante en el tramo.

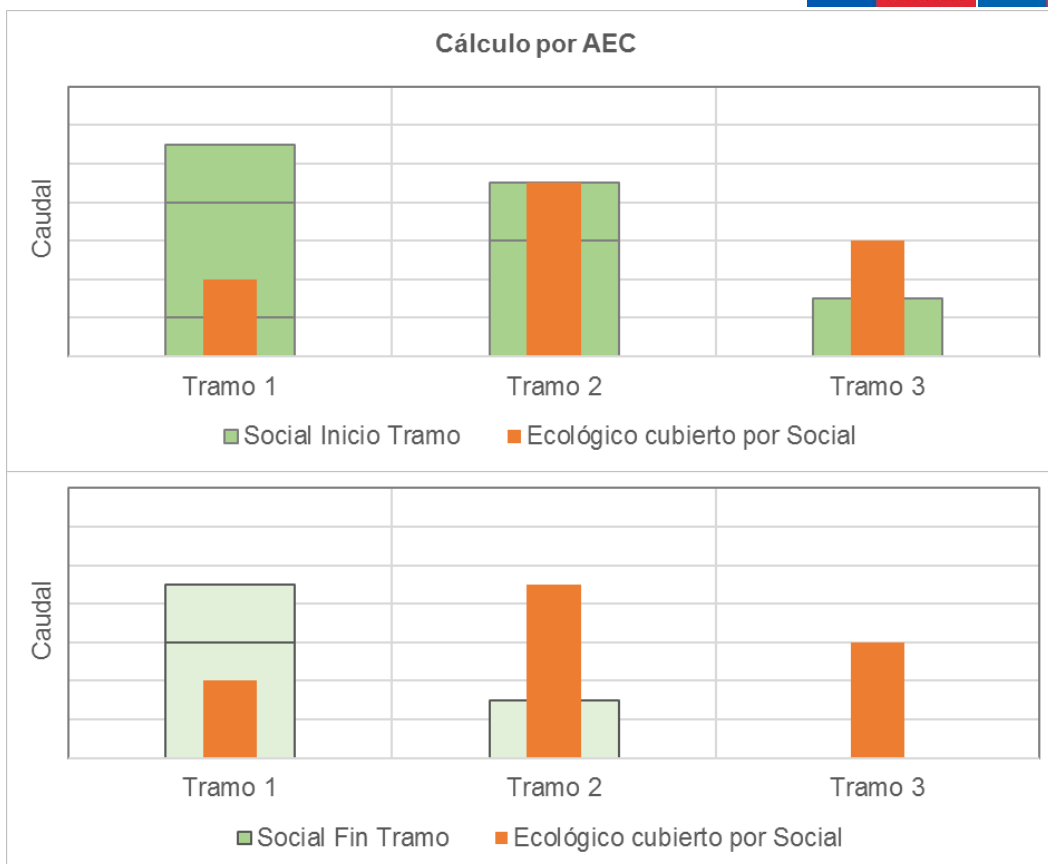


Figura 5.21. Representación del requerimiento Ecológico y Social en un sistema de 3 tramos, considerando el Inicio y Fin de cada uno de ellos (Fuente: Elaboración propia).

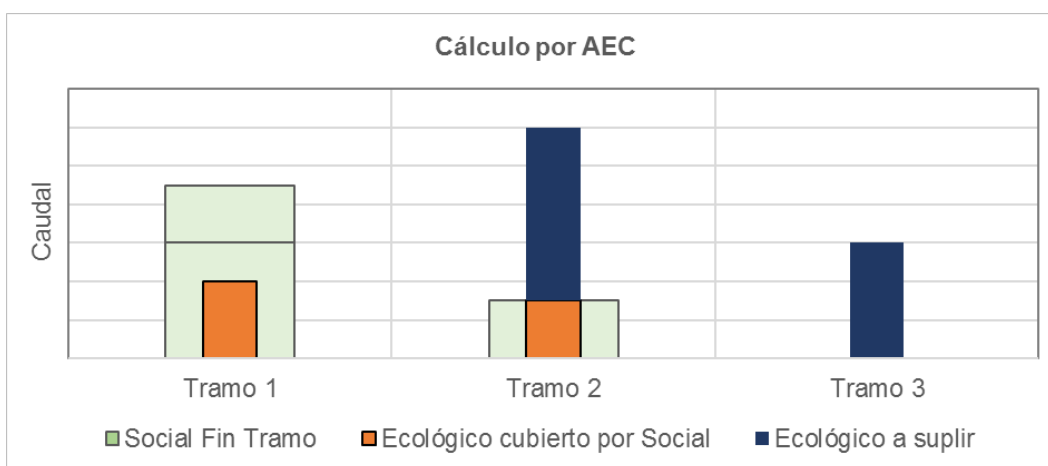


Figura 5.22. Representación de los requerimientos Ecológico y Social, y su relación, en un sistema de 3 tramos, considerando las condiciones en el Fin de cada tramo. El requerimiento Ecológico se presente de dos formas, la primera en naranja (Ecológico (Fuente: Elaboración propia).

- Los requerimientos para el desarrollo (servicios relevantes para el desarrollo) corresponderán a requerimientos (principalmente) de tipo consuntivos, por lo que ellos podrán ser tratados de igual forma que los Sociales. Cabe señalar que estos caudales también podrán ser contabilizados para suplir los requerimientos no consuntivos, como lo son el Ecológico, pero siempre y cuando la condición de caudal disponible sea la suficiente para completar los 3 requerimientos. Así, cuando la disponibilidad sea reducida, estos requerimientos podrán no ser provistos, caso en el cual no podrán cumplir con este otro propósito.
- Los requerimientos para los usuarios (servicios relevantes para usuarios), corresponderán a necesidades de una condición del río, siendo no consuntivos. Similar los requerimientos ecológicos, a lo largo del río ellos podrán ser suplidos por los caudales pasantes y que están asociados a requerimientos ubicados aguas abajo o a los no consuntivos propios del tramo, de forma similar al requerimiento Ecológico. Así, tan solo en los casos en que éste sea superior a la suma de los otros requerimientos (en el fin del tramo), se deberá considerar un caudal extra para el tramo. Cabe recordar que este requerimiento, en general, no impondrá la condición dominante en el tramo, pudiéndose contar con caudales incluso superiores al de este requerimiento e incluso impidiéndolo (condiciones especiales y poco usual).

Contando con la definición del régimen de caudal ambiental para cada AEC analizada, es posible realizar un análisis del sistema completo e integrar los caudales de todo el sistema utilizando las consideraciones y recomendaciones anteriores. A continuación, se entregará un ejemplo hipotético de aplicación a un sistema con 3 tramos (AEC) principales.

5.5.4.1 Ejemplo de integración del caudal ambiental

El régimen de caudal ambiental estará dado por la serie de tiempo de un caudal medio mensual requerido en cada tramo. Este requerimiento, como fue mencionado anteriormente, guardará relación con la estadística hidrológica del sistema. La Figura 5.23 se muestra un ejemplo de las series de tiempo determinadas para un sistema con 3 tramos contiguos y relacionados, indicándose también los caudales asociados a la condición media “natural” del sistema ($P_{exc}=50\%$). En cuanto a los caudales del sistema, la forma y magnitud de los hidrogramas de cada tramo, indicando la existencia de aportes intermedios que permiten el contar con mayores caudales hacia aguas abajo. Estos aportes podrán ser diversos, correspondiendo a aportes difusos, aportes por un afluente al sistema, o presencia de afloramientos locales entre tramos. Estos aumentos son considerables en algunos meses y nulos en otros, por lo que existirán períodos del año en los que el sistema completo será sostenido por los aportes desde agua arriba.

De la figura se observa como el requerimiento Social se encuentra relacionado entre tramos, teniéndose que el requerimiento aumenta hacia aguas arriba, dando cuenta del aporte requerido agua abajo. Se debe señalar que en este caso, aun cuando existan aportes intermedios ellos no son permanentes en el año, por lo que la definición del caudal ambiental teórica deberá considerar la dependencia completa del tramo aguas arriba y asegurar así el recurso. Los requerimientos ecológicos contarán con mayor variabilidad, por ser tramo específico y dependiente de las características ecológicas de cada tramo.

Por otra parte, de forma similar al requerimiento Social, los caudales para el Desarrollo son (principalmente) consuntivos, pero ellos no necesariamente se encuentran estrictamente ligados hacia aguas arriba, dada la disponibilidad de recursos intermedios. Por último, los

requerimientos de Usuarios también son tramo específico, y en general, ellos requerirán de condiciones por sobre los otros. Estos no necesariamente estarán ligados entre tramos.

Finalmente, se debe notar que los requerimientos cuentan con el ordenamiento planteado por la priorización según criterios para la definición del caudal ambiental, con lo que ante la reducción del caudal del río (de forma natural), la restricción será aplicada a los servicios prestados de forma coherente con lo planteado en la priorización.

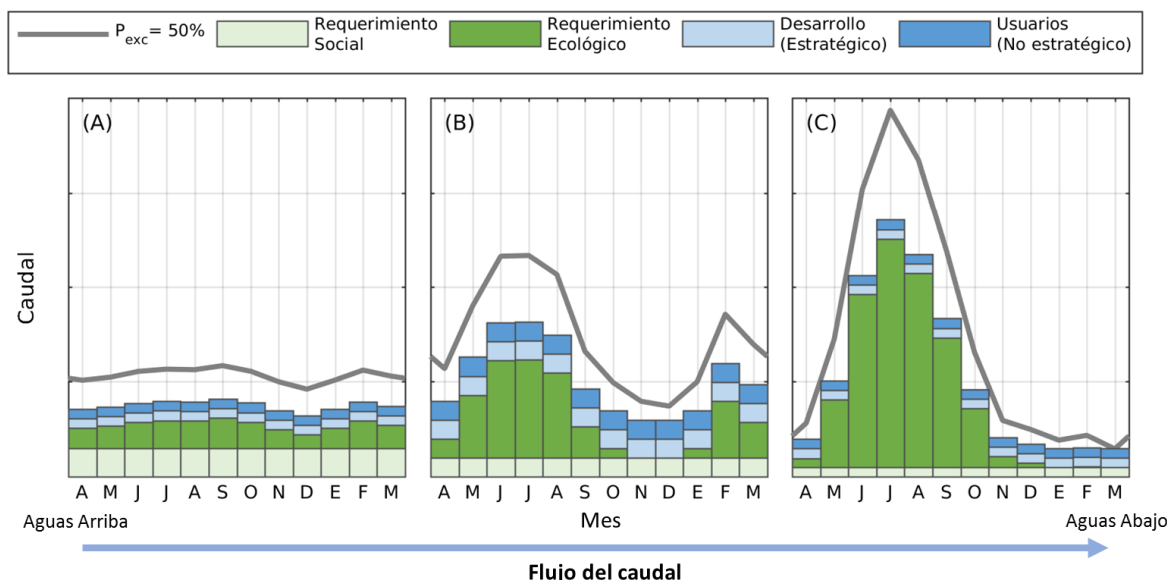


Figura 5.23. Representación del régimen de caudal ambiental en los 3 tramos definidos y hacia aguas abajo. Curva en gris representa la condición media del sistema dada por la curva de probabilidad de excedencia de 50% ($P_{exc}=50\%$), y que definiría la condición “natural” del sistema. El color de cada parte de las barras, representan los requerimientos del caudal ambiental (Fuente: Elaboración propia).

5.5.4.2 Ejemplo de gestión del caudal ambiental

Finalmente, en cuanto a los períodos en los cuales las condiciones de caudal disponible en el río no sean las suficientes, como por ejemplo, durante un período de años secos y en donde los caudales son bajos (con probabilidad de excedencia alta). La definición del caudal ambiental del sistema es realizada en base a una condición media del sistema, la que se entiende como la más representativa del mismo, y por lo que existirán período en los que los caudales no permitan satisfacer el caudal ambiental mensual definido. En estos períodos, y considerando que existe una priorización intrínseca de las necesidades en la definición de los criterios para la definición del caudal ambiental, la condición a seguir en términos de la distribución y administración de las aguas se regirá por la priorización (ordenamiento) de las componentes del caudal ambiental.

De forma gráfica, en la Figura 5.24 se muestra la aplicación de la priorización (criterios) para un período en el cual el caudal disponible ($P_{exc}=85\%$) es muy inferior a la condición media ($P_{exc}=50\%$). En ella se observa que tan solo en algunos meses se podrá proveer todas las componentes del caudal ambiental (meses de enero y marzo), y en el resto existen requerimientos no provistos. De estos últimos casos, en los meses abril y junio no se posible

proveer los requerimientos asociados a los Usuarios y al Desarrollo. El resto de los meses no contaría con provisión de los caudales asociados al requerimiento de los Usuarios.

Del ejemplo se observa que, la priorización de los criterios (y consecuentemente de los requerimientos), permitiría una eficiente aplicación del régimen de caudal ambiental y gestión del recurso.

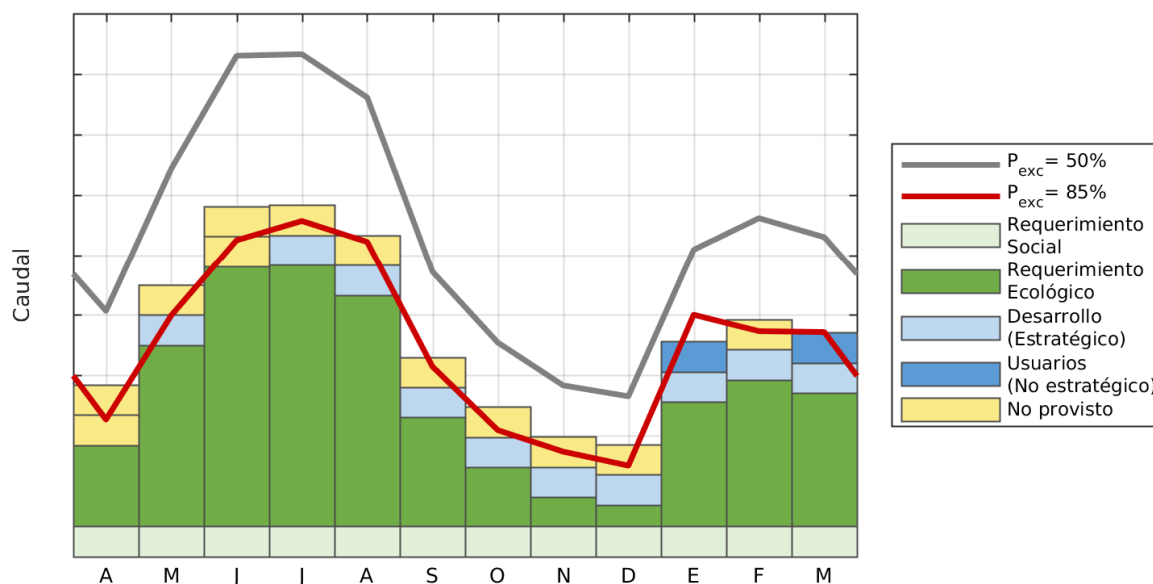


Figura 5.24. Representación del régimen de caudal ambiental en uno de los tramos definidos, mostrándose la condición media del sistema (P_{exc} de 50%) y una condición normal de menor caudal del río (P_{exc} de 85%), donde parte de los requerimientos del caudal ambiental no podrán ser provistos por condiciones naturales del río (Fuente: Elaboración propia).

Finalmente, cabe recordar que en la estimación de la condición “natural” debieran ser sido incluidos los servicios más básicos, como los de provisión de aguas para actividades ancestrales de la comunidad y para agua de consumo, con lo que esos servicios contarían con una condición idónea bajo el régimen de caudal ambiental, y estarían contenidos en los Requerimientos sociales.

6 ETAPAS PARA LA EVALUACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL

A continuación, se desarrollan y entregan antecedentes respecto de las etapas requeridas para la evaluación del caudal ambiental, lo cual es posible tras la definición y estimación de este. Así, la evaluación considera el contraste de los diferentes periodos, condiciones y escenarios del río, respecto del caudal ambiental, con lo que se tendrán antecedentes para la gestión de los recursos. La gestión posible de ser propuesta dependerá de los resultados y contraste de las condiciones en los diferentes períodos, determinándose la actual y futura disponibilidad de recursos (si es que ellos existieran) en el río para nuevos desarrollos y usos, o en el caso contrario, la existencia actual o futura de un déficit del caudal pasante como consecuencia de una sobreexplotación de este. En ambos casos, la información obtenida permitirá la gestión y manejo del recurso, tanto para nuevos desarrollos (en el caso de existir un margen a explotar) o para la planificación y ejecución de una reparación del sistema fluvial.

6.1 Etapa 6: Configuración actual del sistema y definición de escenarios futuros de la disponibilidad de agua para la evaluación.

La condición actual del sistema fue definida anteriormente con la condición hidrológica actual conocida, junto con definición de los ecosistemas posibles para ella. Como parte del levantamiento de la configuración actual del sistema, en términos de los derechos de extracción y otros usos del agua del sistema, se deberán identificar los períodos en seguirán existiendo (operando) cada uno de ellos, información que será necesaria en la definición de los escenarios futuros a evaluar.

En el caso de la configuración futura del sistema, ella debe ser determinada para comprender y evaluar los cambios a generarse a raíz de las tendencias del cambio natural (cambio climático), junto con poder también evaluar las proyecciones de explotación y uso de los recursos. Para la definición de la condición climática futura, podrá desarrollarse la hidrología futura asociada a los escenarios de cambio climático propuestos por el IPCC (2014), con lo que se podrá contar con escenarios de disponibilidad futura. En términos de la explotación y uso futuro del recurso, se podrán evaluar múltiples configuraciones basadas en la actual explotación y las proyecciones de nuevos desarrollos productivos de la Región. Como mínimo, se deberá definir la configuración futura “natural” (sin extracciones o explotación del recurso), y la configuración futura bajo el actual esquema de uso.

En el caso del estudio desarrollado para el río Loa, la condición hidrológica futura fue desarrollada en base al desarrollo de la simulación y “downscaling” de los escenarios de cambio climático propuestos por el IPCC (2014). Los escenarios de cambio climático propuestos por IPCC corresponden a los escenarios RCP (“Representative Concentration Pathways”), los cuales describen escenarios futuros a desarrollarse bajo diferentes condiciones de emisión de gases invernadero por actividad antrópica. Esta emisión y exceso de gases en la atmósfera puede ser traducido como un aumento en el forzamiento radiativo total en la atmósfera terrestre para el período entre los años 2000 y 2100. Así, se desarrollan escenarios en el rango de “bajas emisiones”, donde se considera una reducción considerable en las emisiones actuales, hasta escenarios en donde incluso se tiene un aumento de las emisiones (altas emisiones). Así, los escenarios quedan definidos por los siguientes escenarios:

- RCP 2.6 W/m² : escenario con el mínimo aumento en el forzamiento radiativo, que considera una limitación de las tasas de emisión de gases invernaderos y con el peak de emisiones en año 2020, para luego decaer hasta casi cero en 2080 aproximadamente. El aumento en la absorción de radiación en la atmósfera asociado sería de 2.6 W/m² (Watts ó Vatios por metro cuadrado), lo que corresponde aproximadamente a 490 ppm de CO₂ equivalente. Este escenario cuenta con una peak de 3 W/m² previo al 2100, tras el cual se inicia el descenso hasta alcanzar el valor representativo del escenario en ese año (van Vuuren et al., 2011; van Vuuren et al., 2007; van Vuuren et al. 2006).
- RCP 4.5 W/m² : escenario intermedio con ruta hacia la estabilización en la emisiones y en la forzante radiativa en un valor de 4.5 W/m² (Watts ó Vatios por metro cuadrado), lo que corresponde aproximadamente a 650 ppm de CO₂ equivalente, en el año 2100 (van Vuuren et al., 2011; Clarke et al., 2007; Smith and Wigley, 2006; Wise et al., 2009).
- RCP 6.0 W/m² : escenario intermedio con ruta hacia la estabilización en las emisiones y en la forzante radiativa en un valor de 6.0 W/m² (Watts ó Vatios por metro cuadrado),

lo que corresponde aproximadamente a 850 ppm de CO₂ equivalente, en el año 2100 (van Vuuren et al., 2011; Fujino et al., 2006; Hijioka et al., 2008).

- RCP 8.5 W/m² : escenario con el máximo aumento en el forzamiento radiativo, que no considera la reducción en las tasas de emisión de gases invernadero. El aumento en la absorción de radiación en la atmósfera asociado sería de 8.5 W/m² (Watts ó Vatios por metro cuadrado), correspondiente a aproximadamente 1370 ppm de CO₂ equivalente. Este escenario alcanzaría un valor representativo de 8.5 W/m² al año 2100 (van Vuuren et al., 2011; Riahi et al., 2007).

En términos gráficos, cada escenario puede ser representado como una serie de tiempo de diferentes variables (condiciones) como se muestra en la Figura 6.1, en donde es posible observar las tendencias de cada uno de los 4 escenarios RCP propuestos.

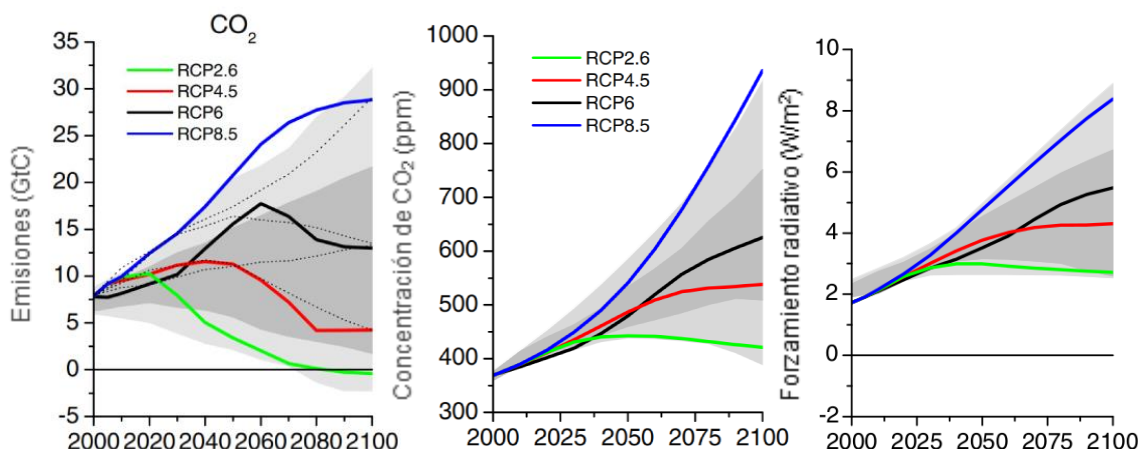


Figura 6.1 (Izquierda) Emisión global de dióxido de carbono (expresado en Giga toneladas de carbón por año) bajo 4 escenarios RCP. (Centro) Concentración de CO₂ equivalente bajo 4 escenarios RCP. (Derecha) Forzamiento radiativo asociado a la concentración de CO₂ para los 4 escenarios RCP (van Vuuren et al., 2011).

En cuanto a la información de cada escenario propuesto por el IPCC, diferentes entidades internacionales de investigación desarrollaron simulaciones climatológicas de escala global, las cuales utilizaron las tendencias de cada escenario en su definición. Cada una de las entidades logró así desarrollar su propio modelo climático o “Modelo general de circulación - GCM”, los cuales contienen información de las diferentes variables que definen los procesos físicos existentes en la superficie terrestre y atmósfera en el tiempo, pero con una resolución gruesa y que no dará cuenta de las características locales, como lo es la orografía de territorio. Por lo anterior, y para poder generar información de carácter local de mayor resolución y la cual dé cuenta de las condiciones particulares de cada sitio, es que es altamente relevante en el desarrollo de la meteorología local la implementación del proceso de “downscaling” de la información. En este proceso se genera información de mayor resolución horizontal, y corresponderá a un proceso de alta complejidad y de alto costo computacional. El proceso de “downscaling” deber ser realizado de forma progresiva, llevando primeramente la información desde la escala original de los GCM (cercana a los cientos de kilómetros) hasta una primera bajada de la información a una escala regional (algunas decenas de kilómetros), tras lo cual esta última escala podrá ser bajada a una escala menor con mayor resolución.

En cuanto el método de “downscaling”, éste es realizado mediante el uso (o acople) con un sistema de modelación numérica y pronóstico climático de mesoescala, como lo es el modelo

WRF (“*Weather Research and Forecasting Model*”) desarrollado por el NCAR (“*National Center for Atmospheric Research*”). Este modelo numérico permite incluir en el proceso las características locales, como lo es la topografía y otros parámetros que repercutirán en el dinámica y desarrollo de la meteorología local. El resultado del proceso anterior corresponderá a series de tiempos con las condiciones meteorológicas en cada uno de los nodos de la grilla, información que dará cuenta de la meteorología local y que puede ser utilizada como base de otros análisis y procesos de estimación o simulación.

En el contexto del desarrollo y evaluación para el río Loa, considerando que la modelación de cambio climático corresponde solamente a una parte de los inputs requeridos en el desarrollo de las evaluaciones futuras del sistema, se decidió utilizar como fuente de información para para el “downscaling” los resultados obtenidos por la Dirección Meteorológicas de Chile (DMC) en el marco del Programa de Trabajo Objetivo N°3 - “*Obtener respuestas sobre las evidencias científicas del cambio climático proyectado para el siglo 21, a través de la elaboración de estudios que aporten información para la planificación y mitigación del cambio climático*” (convenio DMC-DGAC). Estos resultados corresponden al doble “downscaling” de los resultados del modelo global “*Model for Interdisciplinary Research on Climate versión 5 - MIROC5*” (Watanabe et al., 2010) del proyecto CMIP5 (Taylor et al., 2012) que cuenta con una resolución máxima cercana a los 100 km, a dos dominios que llegan a cubrir el territorio nacional, le primero de ellos mayor al territorio y el segundo más ajustado a la extensión de Chile y contenido en el primero como se muestra en la Figura 6.2. El dominio mayor permite asimilar de mejor forma las forzantes de las simulaciones y que cuenta con resolución de celda de 75 km, y el menor de 25 km que corresponde a la base utilizada en el estudio del río Loa para un “downscaling” a la escala de estudio. Cabe señalar que en el procesamiento realizado por la DMC, son consideradas las características locales, como lo es la topografía del territorio.

En cuanto al modelo utilizado, la elección de trabajar en base al desarrollo de la DMC se funda en las siguientes consideraciones:

- a) Se busca utilizar una base robusta y que permita la implementación de un análisis de este tipo en otras localidades del país, lo que es posible dada la extensión del “downscaling” implementado por la DMC.
- b) Se busca una base de trabajo que cuente con uso en otros desarrollos y usos a nivel nacional, lo que permite la utilización de la misma base y la posible comparación e integración del resultados.
- c) El trabajo de la DMC utiliza como base el modelo MIROC5 (de sus siglas en inglés “*Model for Interdisciplinary Research On Climate – versión 5*”), el cual corresponde a uno de los modelos de mayor aplicación, se encuentra entre los modelo de mejor desempeño, cuenta con una mejor representación de fenómenos como El Niño (Watanabe et al, 2010).
- d) La herramienta computacional utilizada por la DMC es la misma propuesta en el presente desarrollo, correspondiente al modelo WRF, el cual cuenta con amplia aceptación y uso por parte de la comunidad internacional por se un modelo con: mayor precisión en la dinámica del modelo y en la representación de los procesos físicos, una mayor capacidad para la resolución de la advección en órdenes mayores, y una menor difusión numérica, con lo que se presenta como una de las mejores herramientas en la resolución detallada del clima (Liu and Warner, 2005).

El downscaling realizado como parte de este estudio, considera el uso del domino menor desarrollado por la DMC (25 km) a escala nacional, para resolver con WRF un dominio a escala

local que es un poco mayor a la región de Antofagasta. La resolución de este modelo es de 8.3 km de grilla y con dimensiones de 90 celdas de ancho por 108 celdas de largo. Este último modelo es utilizado como base para los análisis posteriores, y de ser necesario, sobre el cual podrán ser desarrolladas interpolaciones de los datos a grillas menores de trabajo. Cabe señalar que durante el proceso de interpolación, se considera el respetar la conservación de las cantidades en el dominio para todas las variables materiales, como lo es el caso de la precipitación.

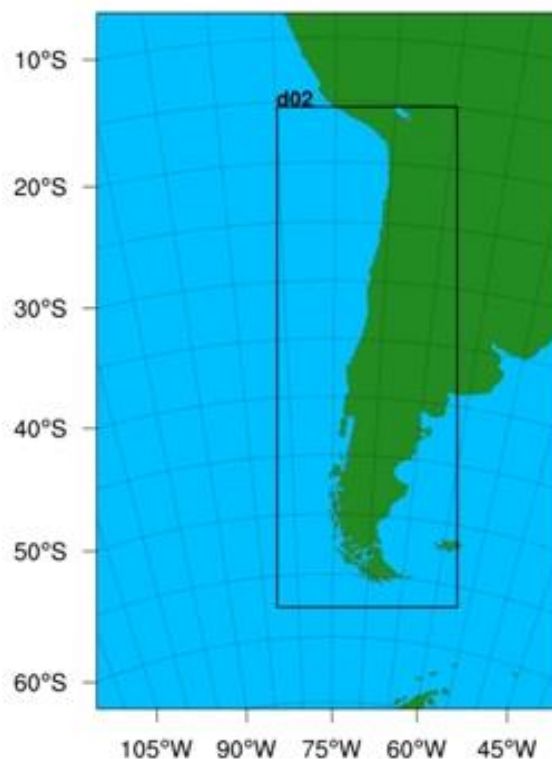


Figura 6.2. Esquema de dominios configurados para experimentos climáticos con modelo WRF. Borde exterior denominado d01 y dominio menor ajustado al territorio nacional denominado d02 (Fuente: DMC en <http://www.meteochile.gob.cl/PortalDMC-web/index.xhtml/>)

Los resultados obtenidos del procesamiento con WRF corresponden a las condiciones meteorológicas futuras, las que por sí solas no podrán entregar la información necesaria para la evaluación de la condición hidrológica futura del río Loa. Es por ello que tras la generación de la meteorología con WRF, los resultados de los escenarios deben ser utilizados en una herramienta o modelo hidrológico, el cual permita el manejo del agua en superficie y su intercambio tanto con la atmósfera (p.ej. evaporación) como con la napa freática (p.ej. procesos de afloramiento e infiltración de las aguas). Tras la implementación del modelo hidrológico, se podrá contar como resultado con la hidrología futura del río Loa, y con ellos, posibilitar la evaluación de la condición futura esperada para cada escenario.

En el estudio realizado en el río Loa, la herramienta hidrológica escogida corresponde al modelo de simulación WEAP (sigla del inglés “Water Evaluation And Planning”) desarrollado por el Stockholm Environment Institute (SEI).

6.2 Etapa 7: Evaluación de la condición actual y futura, considerando escenarios futuros de disponibilidad de agua. Comparación mediante valoración de la presencia de la biota y del desarrollo de los servicios ecosistémicos de escenarios respecto del caudal ambiental definido.

En los pasos anteriores, ya ha sido definida para las condiciones “natural”, actual y escenarios futuros, las características y series de tiempo asociadas a la configuración del uso de los recursos y a la hidrología del sistema, teniéndose además determinado del régimen del caudal ambiental del sistema. Con lo anterior, se debe realizar la evaluación de las condiciones del hábitat y de los servicios ecosistémicos para las condiciones actual y futuras a evaluar. Los resultados obtenidos para la condición actual y escenarios futuros, serán contrastados respecto de los resultados establecidos por la condición de caudal ambiental. Este contraste permitirá evidenciar la condición actual del río y la disponibilidad de recursos en el futuro.

Los resultados obtenidos de la comparación entre escenarios, permitirá evidenciar:

- La existencia de recursos disponibles, posibles de ser asignados para nuevos usos en los períodos del año en que sean superiores al caudal ambiental.
- La sobreexplotación actual de los recursos del sistema, donde la condición media considerando la extracción y uso de las aguas, resulta en un caudal inferior al caudal ambiental requerido.
- Un desequilibrio en el uso de los recursos en términos temporales, teniéndose períodos con una buena condición y otros en condición degradada.

En la Figura 6.3 se muestran algunos ejemplos del tipo de resultado obtenido de la comparación entre condiciones, los cuales mostrarán la existencia o falta de recursos en términos espaciales (en uno o más tramos) o temporales (en uno o más meses del año). Se debe señalar que la comparación es realizada entre el régimen de caudal ambiental definido y el (régimen) caudal en evaluación, donde este último puede corresponder a cualquier condición a evaluar, como pueden ser, el régimen de caudal asociado a la condición actual, a un escenario futuro, o cualquiera otra. En los ejemplos se muestran los 3 tipos de resultados, teniéndose a) una disponibilidad permanente de recursos en el sistema (caudales por sobre el caudal ambiental), y en consecuencias, un sistema en buenas condiciones, b) un déficit de caudal permanente (caudales por bajo el caudal ambiental), y con un sistema posiblemente alterado y que no logra satisfacer los servicios ecosistémicos de buena forma, y c) una condición mixta (desequilibrio), con periodos en donde existen recursos disponibles y otros con un déficit de ellos.

Con lo anterior, se podrá definir el camino a seguir según los objetivos de los usuarios, pudiéndose aumentar los usos ante la identificación de oportunidades, realizar una mejora en el uso de los recursos en términos de la cantidad y ubicación, o detectar la necesidad de una gestión de ellos para la recuperación del sistema.

En la sección siguiente se plantean algunas ideas respecto de la posibilidad de optimizar y mejorar el uso de los recursos.



Figura 6.3. Representación de ejemplos del tipo de resultado obtenido de la comparación de diferentes condiciones con respecto al régimen de caudal ambiental en uno de los tramos definidos. El caudal aquí evaluado es cualquiera, y está dado como un caudal medio de la condición a evaluar ($Q_{\text{Medio evaluado}}$). Los resultados son de tipo mensual en este caso y corresponderán a la existencia de recursos disponibles (naranja) o a la falta de ellos (amarillo), respecto del régimen de caudal ambiental (Fuente: Elaboración propia).

6.3 Etapa 8: Optimización y mejora en el uso del recurso según la priorización de los servicios ecosistémicos, realizada en base al criterio y objetivo establecido por parte de usuarios y actores relevantes.

Los recursos naturales son un bien escaso y, en particular, el agua de los sistemas hídricos que definen la existencia y desarrollo de comunidades y sus actividades en el entorno. Es por lo que un correcto manejo y continua optimización del uso del agua, se ha convertido en una necesidad y responsabilidad de todos los usuarios y administradores del recurso.

Al considerar que muchos de los ríos de nuestro país (si no es que todos) cuentan con algún grado de intervención para el uso y aprovechamiento de sus aguas, los análisis anteriores son sumamente importantes para conocer cuál es el estado actual de ellos, tanto en términos de su ecología y estado, como de la disponibilidad o falta de recursos. Así, es posible contar con una condición superior (mejor) a la del caudal ambiental, dada por la existencia de mayores caudales en el sistema que los asociados al caudal ambiental, lo que indicaría la posibilidad de nuevos usos y extracciones (en escenarios futuros). Por el contrario, también se podrá tener una condición deteriorada respecto de la establecida por el caudal ambiental, lo que plantearía un escenario en donde es necesaria la gestión y mejora del uso, con la posible necesidad de reposición de aguas y otras medidas de reparación, sin dejar espacio a nuevas extracciones. Ambos casos son evaluados respecto de la actual configuración de uso del sistema, por lo que cualquiera sea la oportunidad o necesidad encontrada, el diagnóstico deberá ser contrastado con la condición dada por el escenario futuro sin intervención. Esto es con el fin de conocer cuál sería (o será) la condición futura del sistema sin intervenciones (uso o extracción de sus aguas), permitiendo identificar cual es la tendencia natural del sistema. Así, se podrán definir planes de uso o reparación del sistema que estén acordes a la condición futura esperada.

A continuación, se presentan algunas medidas de optimización del uso, en términos del impacto al sistema, podrán ser:

- a. *Relocalización del punto de extracción de las aguas:* el derecho se traslada de posición hacia un tramo en donde se reduzca la afectación de la condición del tramo y hacia aguas abajo. Como ejemplo se puede mencionar la extracción de aguas disponibles en zonas con requerimientos de condición hidráulica, que podría reducir la calidad (e incluso imposibilitar) del servicio ecosistémico indicado, con lo que una extracción en una zona aguas abajo permitiría una mejora en los servicios del tramo junto con la extracción de las aguas.
- b. *Extracción fraccionada del recursos:* el derecho es fraccionado y extraído desde distintos tramos del río, afectando en menor magnitud al sistema al considerar una variación menor y progresiva del caudal hacia aguas abajo.
- c. *Establecer temporalidad del derecho:* con el análisis de la disponibilidad del recurso en el tiempo será posible establecer los períodos de uso sin afectación asociada, evitando con ello llevar al sistema a una condición degradada de forma temporal y la cual puede generar efectos en el desarrollo de estadios específicos de componentes biológicos particulares.
- d. *Diferir período de la extracción y acumulación del recurso:* conociendo los períodos en donde el recurso es menos escaso, se podrá plantear un aprovechamiento de estas aguas mediante su extracción y acumulación, para su posterior uso.

7 REFERENCIAS

- Acreman M, Arthington A, Colloff M, Couch C, Crossman N, Dyer F, Overton I, Pollino C, Stewardson M, Young W (2014). Environmental flows for natural, hybrid, and novel riverine ecosystems in a changing world. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 12. 466-473. 10.1890/130134.
- Acreman M and Dunbar M (2004) Defining environmental river flow requirements – a review, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 8, 861–876, <https://doi.org/10.5194/hess-8-861-2004>.
- Allan J (1995) *Stream ecology: structure and function of running waters*. Chapman and Hall, New York. xii + 387 pp.
- Armanini D, Monk W, Carter L, Cote D, Baird D (2013). Towards generalised reference condition models for environmental assessment: a case study on rivers in Atlantic Canada. *Environ Monit Assess*. 2013;185(8):6247–6259. doi:10.1007/s10661-012-3021-2
- Bailey R, Kennedy M, Dervish M and Taylor R (1998). Biological assessment of freshwater ecosystems using a reference condition approach: comparing predicted and actual benthic invertebrate communities in Yukon streams. *Freshwater Biology* (1998) 39, 765–774.
- Baker E and Harris P (2012). *Habitat Mapping and Marine Management*. DOI: 10.1016/B978-0-12-385140-6.00002-5. *Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat*. Elsevier Inc. and Crown Copyright. Published by Elsevier Inc. All rights reserved.
- Boyd J (2007). What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 63: 616–626.
- Clarke L, Edmonds J, Jacoby H, Pitcher H, Reilly J, Richels R (2007) *Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations*. Sub-report 2.1a of Synthesis and Assessment Product 2.1. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Washington DC.
- Cogan C, Todd B, Lawton P, Noji T (2009) The role of marine habitat mapping in ecosystem-based management, *ICES J. Mar. Sci.* 66, 2033–2042.
- Davis, Richard; Hirji, Rafik (2003). *Environmental flows: concepts and methods* (English). Water Resources and Environment Technical Note; no. C 1. Environmental Flow Assessment series. Washington, DC: World Bank.
- Davis T, Haratic D, Smith S (2016). Developing a habitat classification typology for subtidal habitats in a temperate estuary in New South Wales, Australia. *Marine and Freshwater Research*, 2016, 67, 1186–1195
- DGA-CEA (2008). *Determinación de caudales ecológicos en cuencas con fauna íctica nativa y en estado de conservación*. S.I.T. N° 187, Santiago
- Dollar E, James C, Rogers K, Thoms M (2007). A framework for interdisciplinary understanding of rivers as ecosystems. *Geomorphology* 89:147–162. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.07.022.

Dyson M., Bergkamp G. and Scanlon J, (2008). Flow – The essentials of environmental flows, 2 nd Edition. Gland, Switzerland: IUCN. Reprint, Gland, Switzerland: IUCN, 2008.

Elosegi A, Díez J, Mutz M (2010) Effects of hydromorphological integrity on biodiversity and functioning of river ecosystems. *Hydrobiologia* 657:199–215. doi: 10.1007/s10750-009-0083-4

EULA (2000). Determinación del caudal mínimo ecológico del proyecto hidroeléctrico Quilleco en el río Laja, considerando variables asociadas a la biodiversidad y disponibilidad de hábitats. Informe de Asistencia Técnica. 120 págs.

Fujino J, Nair R, Kainuma M, Masui T, Matsuoka Y (2006) Multigas mitigation analysis on stabilization scenarios using aim global model. *The Energy Journal Special issue #3*:343–354

García, M (2008). Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice. Volumen 110 de American Society of Civil Engineers (ASCE) Manuals and Reports on Engineering Practice.

Guisan A and Zimmermann N (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135, 147-186.

Guisan A and Thuillier W (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8: 993-1009.

Haines-Young R and Potschin, M (2012). Common International Classification of Ecosystem Services (CICES). University of Nottingham, Nottingham. Obtenido de www.cices.eu

Haines-Young R and Potschin M (2018). Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. University of Nottingham, Nottingham. Obtenido de www.cices.eu

Hall L, Krausman P, Morrison M (1997) *Wildlife Society Bulletin*, Vol. 25, No. 1, pp. 173 - 182. International Issues and Perspectives in Wildlife Management (Spring, 1997).

Harwood A, Johnson S, Richter B, Locke A, Yu X. and Tickner D (2017). Listen to the river: Lessons from a global review of environmental flow success stories, WWF-UK, Woking, UK.

Higginson N and Johnston H (1988). Estimation of friction factor in natural streams. In proceedings of the international conference on river regime. *Hydraulics research*. 251-266

Hijioka Y, Matsuoka Y, Nishimoto H, Masui T, Kainuma M (2008) Global GHG emission scenarios under GHG concentration stabilization targets. *J Glob Environ Eng* 13:97–108

IPCC (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.

Kefford BJ, Buchwalter D, Cañedo-Argüelles M, Davis J, Duncan RP, Hoffmann A, Thompson R. 2016 Salinized rivers: degraded systems or new habitats for salt-tolerant faunas? *Biol. Lett.* 12: 20151072. <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2015.1072>

Kelly M, Juggins S, Guthrie R, Pritchard S, Jamieson J, Rippey B, Hirst H and Yallop M. (2008). Assessment of ecological status in U.K. rivers using Diatoms. *Freshwater Biology* 53, 403–422.

Kueffer C and Kaiser-Bunbury C (2014) Reconciling conflicting perspectives for biodiversity conservation in the Anthropocene. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12: 131-137. doi:10.1890/120201

Liu Y and Warner T (2005) Comparison of the real time WRF and MM5 forecasts for the US army test ranges. In WRF/MM5 User's Workshop, June 2005.

MMA-CEA (2007). Protección y manejo sustentable de humedales integrados a la cuenca hidrográfica.

Montgomery D and Buffington J (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage rivers. *GSA Bulletins*. 109(5): 596-611.

Navarro J, McCauley D and Blystra A (1994). Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) for Modelling Fish Habitat. *Journal of Water Management Modeling* R176-01. doi: 10.14796/JWMM.R176-01.

Nielsen D, Brock M, Rees G, Baldwin D (2003). Effects of increasing salinity on freshwater ecosystems in Australia. *Aust J Bot* 51:655–665.

O'Keeffe J and Le Quesne T (2009). 'Keeping rivers alive', A Primer on Environmental Flows and Their Assessment. WWF Water Security Series, 2.

O'Keeffe J (2012). Environmental Flow Allocation as a Practical Aspect of IWRM. Chapter 4 in 'River Conservation and Management' Eds: Philip J Boon and Paul J Raven. Publisher: Wiley-Blackwell. Pages 43 – 55. ISBN: 978-0-470-68208-1.

Parasiewicz P (2007). The mesohabsim model revisited. *River Research "and applications*. 23(8): 893-903, Doi: 10.1002/rra.1045.

Parker H and Oates N (2016). How do healthy rivers benefit society? A review of the evidence. WWF and ODI Working Paper 430. February 2016.

Peredo-Parada M et al (2011). Implementation of an eco-hydrological classification in Chilean rivers. *Gayana*. 75(1): 26-38, DOI: 10.4067/S0717-65382011000100003.

Pickett S, Cadenasso M (2002) The Ecosystem as a Multidimensional Concept: Meaning, Model, and Metaphor. *Ecosystems* 5, 1–10 (2002) doi:10.1007/s10021-001-0051-y

Pickett S and Ostfeld R (1995) The shifting paradigm in ecology. En: Knight R and S Bates (eds) *A new century for natural resources management*: 261-278. Island Press, Washington DC.

Poff N., Allan J, Bain M, Karr J, Prestegard K, Richter B, Sparks R and Stromberg J (1997). The Natural flow Regime. *BioScience*, 47, 11, 769-784.

Potschin, R (2011). UK Common International Classification of Ecosystem Services (CICES). University of Nottingham, Nottingham. Obtenido de www.cices.eu

Riahi K, Grübler A, Nakicenovic N (2007) Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technol Forecast Soc Chang* 74:887–935

Rosgen D (1994). A Classification of natural rivers. *Wildland Hydrology*, USA. 22(3): 169-199, DOI: 10.1016/0341-8162(94)90001-9.

SAG-CEA (2006). Conceptos y criterios para la evaluación ambiental de humedales. Descargado desde: <https://www.sag.gob.cl/content/conceptos-y-criterios-para-la-evaluacion-ambiental-de-humedales>

Servicio de Evaluación Ambiental-SEA (2016) Guía metodológica para determinar el caudal ambiental para centrales hidroeléctricas en el SEIA.

Sieber J (2019). Water Evaluation and Planning (WEAP) System, Software version: 2019.0, Stockholm Environment Institute, Somerville, MA, USA, <https://www.weap21.org>

Singh V and Frevert D (2005). *Watershed models*. CRC Press.

Smith S, Wigley T (2006). MultiGas forcing stabilization with minicam. *The Energy Journal Special issue #3*:373–392

Snelder T. and Biggs B (2002). Multiscale river environment classification for water resources management. *Journal of the American water resources association*. 38(5):1225-1239.

Tansley A (1935). The Use and Abuse of Vegetational Concepts and Terms. *use Abus Veg Concepts Terms* 16:284–307.

Taylor K, Stouffer R and Meehl G (2012) An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485–498.

USAID (2017) The assessment of environmental flows for the rivers and streams of Georgia methodology. http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00MRW1.pdf

USAID (2018) Environmental Flows Technical Guidance Manual. Manual técnico guía desarrollado por SWP (Sustainable Water Partnership) - <https://files.globalwaters.org/water-links-files/Environmental-Flows-Technical-Guidance-Manual.pdf>

USGS (2001) PHABSIM for Windows: User's Manual and Exercises, Midcontinent Ecological Science Center, U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior, Colorado, USA.

Van Vuuren D, Eickhout B, Lucas P, den Elzen M (2006). Long-term multi-gas scenarios to stabilise radiative forcing—exploring costs and benefits within an integrated assessment framework. *Energ J* 27:201–233

Van Vuuren D, Den Elzen M, Lucas P, Eickhout B, Strengers B, Van Ruijven B, Wonink S, Van Houdt R (2007). Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Clim Chang* 81:119–159

Van Vuuren D, Edmonds J, Kainuma M et al (2011). *Climatic Change*, 109:5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

Vaughan IP, Diamond M, Gurnell AM, et al (2009). Integrating ecology with hydromorphology: A priority for river science and management. *Aquat Conserv Mar Freshw Ecosyst* 19:113–125. doi: 10.1002/aqc.895.

Ward J (1989). The Four-Dimensional Nature of Lotic Ecosystems. *JN Am Benthol Soc* 8:2-8.

Watanabe M, Suzuki T, O'ishi R, Komuro Y, Watanabe S, Emori S, Takemura T, Chikira M, Ogura T, Sekiguchi M, Takata K, Yamazaki D, Yokohata T, Nozawa T, Hasumi H, Tatebe H, Kimoto M (2010). Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *Journal of Climate*. 23. 6312-6335. 10.1175/2010JCLI3679.1.

Wesche T and Rechar P (1980). A summary of instream flow methods for fisheries and related research needs. Water resources research institute, University of Wyoming, Laramie.

Wilcock P and Crowe J (2003) Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 129(2): 120-128

Wise M, Calvin K, Thomson A, Clarke L, Bond-Lamberty B, Sands R, Smith SJ, Janetos A, Edmonds J (2009). Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy. *Science* 324:1183–1186