

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES**

**ESCUELA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**Análisis de metodologías para el estudio de Caudales Ecológicos.  
Casos de estudio en ríos altoandinos ecuatorianos**

**Monografía previa a la obtención del título de  
Licenciada en Ciencias Biológicas**

**ADRIANA LETICIA FLACHIER TROYA**

**Quito, 2016**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que la Monografía de Licenciatura en Ciencias Biológicas, de la Sra. Adriana Leticia Flachier Troya ha sido concluida de conformidad con las normas establecidas; por lo tanto, puede ser presentada para la calificación correspondiente.

Dra. Nelly Patricia Carrera Burneo

Quito, 21 de noviembre de 2016

## TABLA DE CONTENIDOS

|       |  | Pg. |
|-------|--|-----|
| 1.    | Resumen.....   | 1   |
| 2.    | Abstract.....  | 2   |
| 3.    | Introducción.....  | 3   |
| 4.    | Desarrollo teórico.....  | 7   |
| 4.1.  | Conceptos de caudal ecológico.....                                 | 7   |
| 4.1.1 | El río.....  | 7   |
| 4.1.2 | Historia del concepto de caudal ecológico.....                     | 12  |
| 4.1.3 | Conceptos de caudal ecológico y su evolución.....                  | 14  |
| 4.1.4 | Caudal ecológico y caudal ambiental.....                           | 19  |
| 4.1.5 | Régimen de caudal ecológico.....                                   | 20  |
| 4.2.  | Importancia del caudal ecológico.....                              | 24  |
| 4.2.1 | La biota acuática.....   | 24  |
| 4.2.2 | El río continuo.....   | 26  |
| 4.2.3 | Las intervenciones en los ecosistemas fluviales.....               | 28  |
| 4.2.4 | Efectos ecológicos de las intervenciones.....                      | 30  |
| 4.2.5 | Los servicios ecosistémicos de los ríos.....                       | 32  |
| 4.2.6 | La calidad del agua y los caudales.....                            | 35  |
| 4.2.7 | La gestión integrada de los recursos hídricos.....                 | 38  |
| 4.3.  | Metodologías y herramientas para definir el caudal ecológico.....  | 39  |
| 4.3.1 | Métodos con enfoque hidrológico.....                               | 40  |
| 4.3.2 | Métodos con enfoque hidráulico.....                                | 48  |
| 4.3.3 | Métodos con enfoque hidrobiológico (ecohidrológico-ecohidráulico)  | 52  |
| 4.3.4 | Métodos con enfoque holístico o funcional.....                     | 59  |
| 4.3.5 | Ventajas y desventajas de los diferentes enfoques.....             | 63  |
| 4.3.6 | Selección del método para la determinación del caudal ecológico... | 66  |
| 4.4.  | Legislación ecuatoriana sobre caudales ecológicos.....             | 68  |
| 4.4.1 | Constitución de la república del Ecuador.....                      | 68  |
| 4.4.2 | Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento.....     | 69  |
| 4.4.3 | TULSMA, Libro VI, Anexo 1B.....                                    | 72  |
| 4.5   | Casos de estudio de caudal ecológico en ríos altoandinos.....      | 79  |
| 4.5.1 | Ríos altoandinos, características e importancia.....               | 79  |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.5.2 | Análisis de tres casos de estudio en ríos altoandinos..... | 86  |
| 5.    | Conclusiones.....  | 109 |
| 5.1   | Sobre la teoría del caudal ecológico.....                  | 109 |
| 5.2   | Sobre los casos de estudio.....                            | 113 |
| 6.    | Recomendaciones.....                                       | 116 |
| 7.    | Referencias bibliográficas.....                            | 123 |
| 8.    | Figuras.....   | 138 |
| 9.    | Tablas.....  | 148 |

## 1. RESUMEN

El Caudal Ecológico ( $Q_e$ ) es un tema que tiene su historia desde los años 40, al tratar de dar solución a las alteraciones de los flujos de agua y pérdida de los ecosistemas acuáticos, debido a las actividades antrópicas, principalmente de captación de agua, como en proyectos hidroeléctricos, de riego y agua potable. En el tiempo se han desarrollado múltiples métodos que responden a diferentes objetivos y enfoques: hidrológicos, hidráulicos, hidrobiológicos y holísticos. Generalmente consideran las variaciones hidrológicas, temporales y estacionales, así como las preferencias de hábitat de las especies.

Esta monografía presenta la evolución de las diferentes definiciones, enfoques y métodos de determinación del  $Q_e$ . Además, analiza las metodologías de tres casos de estudio de  $Q_e$  realizados en el Ecuador en la región altoandina: (i) cuenca alta de río Pastaza, (ii) microcuencas de los ríos Papallacta y Guayllabamba y (iii) microcuenca del río Machángara. El primero muestra un enfoque puramente hidrológico y se basa en el régimen de caudales naturales. El segundo utiliza una herramienta ecohidráulica desarrollada a través de un programa de computación, que considera los hábitats viables de macroinvertebrados acuáticos bénticos. El tercer estudio tiene también un enfoque hidrológico y analiza el caudal ecológico en función de la calidad del agua óptima para la supervivencia de macroinvertebrados.

Los tres métodos analizados muestran valores de  $Q_e$  superiores al 10% del caudal medio anual, porcentaje que la legislación ecuatoriana había adoptado antes de las reformas ambientales. Además, demuestra que la aplicación de un porcentaje fijo es inapropiado, y que el estudio debe proveer un Régimen de Caudales Ecológicos acorde a las variaciones naturales hidrológicas. Se concluye que el grupo taxonómico más adecuado para determinar el  $Q_e$  en las áreas altoandinas, es el de los macroinvertebrados bénticos.

**Palabras clave:** caudal ecológico, régimen de caudales, macroinvertebrados bénticos, hidromorfología, ecohidráulica.

## 2. ABSTRACT

The Ecological or Environmental flow ( $Q_e$ ) is a subject which has its history since the 1940s, trying to give solutions to flow alterations and the loss of aquatic ecosystems, due to anthropogenic activities, mainly water subtraction. Until now, experts have been developed hundreds of methodologies with different objectives and approaches (hydrologic, hydraulic, hydrobiological and holistic); some are simplistic (like 10% of the average annual flow), others are sophisticated tools that consider the seasonal variations and the species preferences.

This monograph shows the evolution of the different definitions, approaches and methods to calculate  $Q_e$ . In addition, three case studies in Ecuadorian Andean Rivers are analysed: (i) Pastaza high basin, (ii) Papallacta and Guayllabamba watersheds and (iii) Machángara watershed. The first one presents a hydrologic approach and is based on the natural flow regime. The second uses an eco-hydraulic tool, developed through a computer software, which considers viable habitats for aquatic benthic macroinvertebrates. The third study also has a hydrological approach and determine the  $Q_e$  through the optimal water quality for macroinvertebrates.

The three analysed methods show  $Q_e$  values greater than 10% of the average annual flow rate; this percentage was adopted by Ecuadorian legislation before environmental reforms, and some hydroelectric projects are still using this method as  $Q_e$ . It also shows that the application of a fixed percentage is inappropriate to conserve aquatic life, and that the  $Q_e$  studies may provide an ecological flow regime according to natural hydrological variations. It is concluded that benthic macroinvertebrates are shown as more suitable taxonomic order for  $Q_e$  in Andean rivers.

**Key words:** ecological flow, environmental flow, flow regime, macroinvertebrates, hydromorphology, eco-hydraulic.

### 3. INTRODUCCIÓN

Históricamente en el mundo, inclusive en el Ecuador, los ríos han sido captados para dar cabida a un sin número de proyectos de infraestructura y de provisión de servicios, como son: hidroelectricidad, agua para consumo humano, riego, recreación, piscicultura, entre otras. La captación de estos cuerpos de agua ha implicado grandes cambios físicos y ecológicos en los ecosistemas acuáticos. La causa principal de esta transformación es la reducción de los caudales (Acreman y Dunbar, 2004).

El caudal de los ríos es uno de los parámetros determinantes para la funcionalidad del ecosistema acuático, ya que define sus características morfológicas, estructura del fondo y de las riberas, calidad del agua con su capacidad de autodepuración y las características de las comunidades bióticas existentes. Los ciclos de vida de las especies acuáticas existentes en un determinado cuerpo de agua, están adaptados evolutivamente a las fluctuaciones temporales de los caudales; por lo que éstas son importantes para la integridad ecológica de los ríos (Poff *et al.*, 1997).

A medida que se ha incrementado el conocimiento sobre la funcionalidad de los ríos y sus beneficios integradores, ha cobrado importancia el tema del mantenimiento del caudal, como un eje importante para asegurar la supervivencia de las especies acuáticas, de su biodiversidad y de los servicios ecosistémicos: la regulación hídrica, recarga de acuíferos, control de inundaciones y sequías,

mantenimiento de los flujos sólidos (sedimentos), creación de microclimas, entre otros.

Así nace el término de Caudal Ecológico como el flujo de agua en cantidad, calidad y variabilidad necesaria para mantener los hábitats acuáticos, así como los bienes y servicios ecosistémicos, de los cuales depende la sociedad humana (Diez, 2011).

Para un uso adecuado de los recursos hídricos, el estudio de los Caudales Ecológicos permite analizar las consecuencias de actividades antrópicas particulares que modifican alguna variable medible del régimen hidrológico: magnitud, frecuencia, duración, ritmo, tasa de cambio y fenómenos extremos como períodos de inundaciones y de sequía (Poff *et al.*, 1997).

En el Ecuador también se ha despertado el interés por incluir el tema del Caudal Ecológico dentro de su legislación (Arias y Terneus, 2012), y en realizar estudios que permitan calcularlo para diferentes condiciones geográficas, como la región altoandina, donde se ubica el ecosistema de páramo, considerado un ecosistema frágil y muy importante desde el punto de vista hidrológico (Mena *et al.*, 2001).

El estudio de Beltrán y colaboradores (2009), indica que el área total de la zona altoandina en el Ecuador tiene una extensión de 2'293.732 ha (9% del territorio nacional), incluyendo el superpáramo, páramo, bosques altimontanos y bosques montanos; a partir del límite inferior altitudinal de 2600 (sur del país) y

2800 (centro y norte del país). Ciertos estudios (Buytaert *et al.*, 2006; Mena *et al.*, 2001) muestran como la región altoandina y los páramos están sufriendo severas intervenciones y transformaciones, a pesar de ser el lugar donde se almacena el agua y se originan las mayores cuencas hidrográficas del país. Según Buytaert y colaboradores (2006), se hicieron estimaciones de producción de agua del ecosistema de páramo, obteniéndose valores entre 600 and 1000 mm/año. Esto es cerca de dos tercios de la lluvia anual en la zona altoandina, aunque los mismos autores consideran que es un valor subestimado, porque los estudios fueron muy puntuales.

Debido a su capacidad de almacenamiento de agua y las características topográficas de los Andes, los ríos pertenecientes a esta región poseen caudales que los hacen propicios para los proyectos de captación de agua. Por ejemplo, en la ciudad de Quito un 85% (7,4 m<sup>3</sup>/s) del agua potable proviene de los cauces del páramo (Buytaert *et al.*, 2006). En lo que se refiere a proyectos de riego, los mismos autores han calculado que un 80% del agua superficial es captada.

Gracias a las altas pendientes, las velocidades de la corriente permiten el desarrollo de proyectos hidroeléctricos. En el Ecuador, aproximadamente un 45% de la electricidad proviene de proyectos ubicados en la zona altoandina (Mulligan *et al.*, 2010). Entre 2006 y 2015, se esperaba una demanda por electricidad que incremente en una tasa anual del 4 – 6%, por lo que existen nuevas propuestas de proyectos hidroeléctricos, algunos ya en construcción y licitación.

Por lo tanto, los cauces hídricos de los altos Andes han sido y continúan siendo transformados, a pesar de su importancia por ser originarios de las grandes cuencas hidrográficas. Por esa razón, los estudios de Caudal Ecológico en los ríos altoandinos requieren visibilizarse y analizarse, para determinar tendencias y su aplicabilidad.

Por lo expuesto, la finalidad de la monografía es realizar el análisis de las metodologías utilizadas en estudios relevantes de caudal ecológico en ríos altoandinos, para presentar recomendaciones para futuros estudios.

Para lograr ese objetivo, primeramente se realiza una síntesis de los conceptos de Caudal Ecológico y otros términos de similar connotación, así como las metodologías que han sido las más utilizadas y su evolución en el tiempo. Además, se realiza una recopilación de la legislación en torno a este tema en el Ecuador y se realiza una caracterización breve de los ecosistemas fluviales altoandinos y su importancia.

## **4. DESARROLLO TEÓRICO**

### **4.1 CONCEPTOS DE CAUDAL ECOLÓGICO**

Para entender de mejor manera los conceptos de Caudal Ecológico, es necesario primeramente conocer las características físicas y ecológicas de los ríos o ecosistemas fluviales, lo cual se presenta en el siguiente acápite.

#### **4.1.1 EL RÍO**

Anderson y colaboradores (2010) definen al río como una corriente de agua superficial que fluye por un cauce gracias a un efecto de gravedad.

##### **Origen de los ríos**

Los ríos generalmente nacen en zonas altas sujetas a efectos de las pendientes y la gravedad. Sus orígenes pueden ser muy diversos pero relacionados a los ciclos hidrológicos. Por lo general, el agua de la lluvia busca su camino a través de: (i) canales formados por deposiciones de lava, (ii) depresiones propias de la topografía de las cordilleras, (iii) terrenos socavados por la fuerza de la corriente favorecida por la gravedad, y (iv) vertientes de agua subterránea (Roldán y Ramírez, 2010). Las acumulaciones de agua en las alturas como lagos, lagunas y bofedales, también dan origen a los ríos.

Estos humedales generalmente se forman en planicies o depresiones en los páramos, jalcas o punas de los Andes sudamericanos. Se trata de acumulaciones de agua producto de los deshielos de los nevados o por constantes lluvias y condensaciones de agua (ej. lagos glaciares, bofedales, turberas). Estos ecosistemas considerados frágiles e importantes para la regulación hídrica, tienen la capacidad de almacenar agua de manera permanente, aunque el nivel de agua depende de las estaciones climáticas (Convención de Ramsar, 2005).

Esa es una de las principales razones por las que los ecosistemas altoandinos, como los páramos ecuatorianos, son relevantes desde el punto de vista ecológico y socioeconómico (Buytaert *et al.*, 2006). Roldán y Ramírez (2010) explican que los páramos “se comportan como una esponja que va soltando lentamente su contenido, alimentando miles de riachuelos que finalmente harán parte de numerosas cuencas hidrográficas”.

### **La hidromorfología**

Las cuencas hidrográficas son zonas geográficas en donde la precipitación o condensación de agua cae sobre la superficie terrestre para ser drenada por un sistema de corrientes hacia un sitio de desembocadura. Inicia con pequeños riachuelos en las nacientes que van uniéndose en su recorrido, a manera de redes ramificadas de drenajes, para formar un cauce de mayor envergadura que desemboca en el mar o en otro cuerpo de agua (Roldán y Ramírez, 2010).

Dependiendo del tamaño de los cauces de la red de drenaje, estos se clasifican en diferentes órdenes (ver Figura 1):

- Orden 1: la menor corriente, más cercana a la naciente, que no posee otro cauce tributario (cauce afluente, que se une al mismo).
- Orden 2: corriente que se forma por la unión de al menos dos tributarios de orden 1.
- Orden 3: corriente que se forma por la unión de al menos dos tributarios de orden 2.
- Orden 4: corriente que se forma por la unión de al menos dos tributarios de orden 3.

Los cauces de orden 1 pueden además unirse a los de orden 3 y 4, y así sucesivamente. De manera que algunas cuencas hidrográficas forman redes muy complejas. De igual manera, pueden existir cuencas hidrográficas con un mayor número de órdenes (Roldán y Ramírez, 2010).

Dependiendo de su punto de salida, las cuencas hidrográficas pueden clasificarse en dos tipos: endorreicas (desembocan en un lago) y exorreicas (desembocan en otro río o en el mar). De esa manera, los ecosistemas fluviales cumplen una importante función en el ciclo del agua del planeta (Anderson *et al.*, 2010).

Los ríos llevan agua de variadas características químicas, dependiendo del suelo o roca por donde fluyan y vayan erosionando, proporcionando características únicas de calidad del agua. A su recorrido, los ecosistemas

fluviales van captando el agua de otros cauces, e incrementando su caudal. La estructura ecosistémica del río, su diversidad biológica y los procesos ecológicos dependen del caudal y de la calidad del agua, por lo que son consideradas variables determinantes y quizás las más importantes del ecosistema fluvial (Smith y Smith, 2007). Las características químicas del agua, a su vez, están definidas por el caudal y la morfología del río.

Los ríos son ecosistemas muy dinámicos, que están en constante cambio; se componen de cuatro dimensiones inter-relacionadas: longitudinales, laterales, verticales y temporales. El transporte de nutrientes, materiales en suspensión (sedimentos), materia orgánica y otros elementos y sustancias químicas, los cuales forman parte de los ciclos biogeoquímicos, dependen de los procesos longitudinales y laterales. Los ríos de forma natural tienen capacidad de autopurificación; su nivel de resiliencia depende de la velocidad de la corriente, el caudal, la turbulencia y de los procesos de descomposición (Roldán y Ramírez, 2010).

La morfología de un río es muy variada dependiendo de características como la edad, estabilidad (estática, dinámica), geometría (rectos, sinuosos, trezados), material de los márgenes y del fondo, materiales que transporta, entre otros; es afectada por el ancho y profundidad, el caudal, la configuración de las curvas, el diámetro del material del fondo, sólidos transportados, pendiente del lecho, tipo de orillas (rocosas, de suelo suelto, con densidad vegetal, playas, etc.). La hidromorfología, con todas estas características y factores sufren cambios en

el tiempo, no es estática, y los seres que allí habitan evolucionan con esos cambios (Poff *et al.*, 1997; Roldán y Ramírez, 2010; Smith y Smith, 2007).

Gracias a la morfología fluvial existen los siguientes tipos de hábitats (Diez, 2011):

- a) Macrohábitats: Tramos aluviales, encajonados, deltas, llanuras de inundación.
- b) Mesohábitats.- Pozas, rápidos, tablas, tramos canalizados.
- c) Microhábitats.- Tocones de árboles, cornisas, cuevas, acumulaciones de grava, enraizados, vegetación sumergida, hojarasca.

Todos estos son sitios apropiados para el desarrollo, refugio, guardería, alimentación y freza de la biota acuática (Diez, 2011).

### **Los flujos de agua y el caudal**

El flujo es la forma como el agua corre por el lecho del río, y depende de la morfología del mismo y características del canal (Roldán y Ramírez, 2010). Existen flujos laminares o turbulentos; los primeros son de recorrido lento y en capas paralelas a la misma velocidad, mientras que los segundos recorren a mayores velocidades y su movimiento es irregular.

La velocidad del flujo o de la corriente se define como la distancia que una masa de agua recorre en una unidad de tiempo definida (Roldán y Ramírez,

2010). Generalmente se la mide en metros por segundo (m/s). El tipo de sustrato, la vegetación de las riberas y las características químicas del agua, influyen sobre la velocidad de la corriente (Aparicio, 1992). Los cauces con menores interrupciones permiten movimientos más rápidos del agua por ejercer menor resistencia, a diferencia de los fondos irregulares o con grandes rocas. Estos aspectos producen un efecto físico hidráulico (Diez, 2011).

El caudal es definido como el volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en una unidad de tiempo determinada (World Meteorological Organization, 2012). Se mide multiplicando el área de la sección transversal (ancho x profundidad) por la velocidad de la corriente. Su unidad de medida por lo general es el metro cúbico por segundo ( $m^3/s$ ) o litros por segundo (l/s).

#### **4.1.2 HISTORIA DEL CONCEPTO DE CAUDAL ECOLÓGICO**

El concepto de “Caudales Ecológicos” (u otros términos similares), empieza a desarrollarse, a medida que el conocimiento sobre la importancia y funcionalidad de los cauces hídricos se hace más evidente, ante la afectación y pérdida del recurso por las actividades antrópicas. Nace inicialmente como una necesidad de limitar la alteración de los flujos de agua, que indirectamente afectan a otros beneficios como es el caso de las pesquerías (Dyson *et al.*, 2003).

Según la revisión bibliográfica que realiza Tharme (2003), los estudios relacionados con caudales ecológicos iniciaron en los años 40 en Estados Unidos.

Sin embargo, en los años 70 es cuando se da un acelerado desarrollo de legislación y normativa ambiental relacionado al mantenimiento de los cauces hídricos, y es cuando empiezan a ensayarse y desarrollarse diferentes metodologías. En los años 80, otros países como Australia, Inglaterra, Nueva Zelanda y Sudáfrica, se unen a tales esfuerzos. Inicialmente los estudios se enfocaron en la conservación de las especies acuáticas de importancia comercial, pero luego se amplió a la conservación de otras comunidades biológicas que permiten mantener la integridad del ecosistema.

Posteriormente, desde los años 90, se incluyen las implicaciones sociales y económicas de la modificación de los caudales, considerando a las poblaciones humanas como usuarios del recurso hídrico. Esa ha sido la tendencia hasta la actualidad (King *et al.*, 2003). Desde aquí los conceptos y sus denominaciones han variado en el tiempo, asociados a un cambio de enfoque metodológico que tiende a una visión más holística; por lo que se desarrolla un nuevo concepto que se lo ha denominado “Caudal Ambiental”, el cual incluye aspectos socioeconómicos, lo que le otorga un enfoque integral.

En la actualidad, otros países del África, Asia, este de Europa y Latinoamérica, están desarrollando estudios de Caudal Ecológico y Caudal Ambiental, considerando las realidades biogeográficas (Dyson *et al.*, 2003).

Al ser el agua un recurso vital, los ríos van a seguir siendo utilizados por el ser humano. Sin embargo, los gestores de los recursos hídricos son más conscientes de que se requiere una nueva perspectiva ecológica que guíe la

gestión de recursos acuáticos hacia formas que permitan sostener la biodiversidad y la integridad de los ecosistemas (Poff *et al.*, 1997).

#### **4.1.3 CONCEPTOS DE CAUDAL ECOLÓGICO Y SU EVOLUCIÓN**

Existen varias definiciones de Caudal Ecológico, y en algunos casos difieren en su enfoque; algunos son puramente hidrológicos, otros ecológicos, otros combinan ambas disciplinas en las nuevas ramas de la ciencia, como son la Ecohidrología y la Ecohidráulica. Incluso, existen conceptos que utilizan un único parámetro hidrológico descriptor u otros que se centran en un régimen de caudales descrito por algunas variables. Se ha llegado a conceptos bastante amplios y holísticos.

Existen otros términos similares a Caudal Ecológico que en su momento fueron considerados sinónimos, tales como: caudales mínimos, básicos, aconsejables, óptimos, de sequía, fluvio-ecológicos, entre otros (Bragg *et al.*, 2005); que se definen como: el caudal capaz de mantener algunas de las funciones básicas del ecosistema fluvial. Otros términos también utilizados, tienen sus variaciones, o son complementarios, como los indicados a continuación:

- Caudal de mantenimiento: “caudal calculado sobre el objetivo de la conservación de los valores bióticos del ecosistema fluvial” (Agència Catalana de l’Aigua, 2006; Rebillard, 2006).

- Caudal de acondicionamiento: “caudal complementario al caudal mínimo o de mantenimiento, para una finalidad concreta, ajena a la conservación de los valores bióticos del ecosistema fluvial y referida a aspectos abióticos (dilución, paisaje, usos recreativos)” (Consuegra, 2013).
- Caudal de limpieza: “caudal que mantiene las características específicas del sustrato, previniendo la invasión de la vegetación del cauce y removiendo la fracción más fina de partículas orgánicas e inorgánicas” (Martínez y Fernández, 2010).
- Caudal máximo: “el mayor caudal que debe circular por el tramo de río regulado y que no debe de ser superado al generar los caudales de mantenimiento, salvo en las grandes avenidas naturales” (Consuegra, 2013; Martínez y Fernández, 2010).
- Caudal de sequía: “caudal muy reducido, propio de años secos, pero suficiente para mantener a las especies en un ecosistema, sin permitir necesariamente su reproducción” (Martínez y Fernández, 2010).

Sin embargo, estos conceptos han evolucionado en el tiempo, agrupándolos en los términos que ahora son mayormente utilizados: Caudal Ecológico y Caudal Ambiental. Estos, en algunos casos, se han empleado como términos sinónimos, pero la mayoría de autores los han diferenciado. A

continuación se exponen algunas definiciones por año de apareamiento y autor(es):

- Reiser y colaboradores (1989): “Cantidad de agua que debe dejarse en el río para mantener los recursos acuáticos en determinado nivel”.
- Richer y colaboradores (1996): “Niveles de régimen hidrológico gestionados para mantener la biota del río y los bienes y servicios valorados socialmente asociados al ecosistema”.
- García y González (1998): “Caudal circulante por un cauce que fuese capaz de mantener el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial que ese cauce contiene en condiciones naturales”.
- King y Louw (1998): “Cantidad del régimen hidrológico original de un río que debería seguir fluyendo aguas abajo para mantener valores característicos específicos del ecosistema”.
- Tharme (2003): “Cantidad del régimen hidrológico original de un río que debería seguir fluyendo aguas abajo y hacia las planicies de inundación para mantener valores característicos específicos del ecosistema”.

- Dyson y colaboradores (2003): “Régimen hídrico que se establece en un río, humedal o zona costera, para sustentar ecosistemas y sus beneficios donde hay usos del agua que compiten entre sí, y donde los caudales están regulados”.
  
- King y colaboradores (2003): “Agua que se deja en el sistema río o se libera con un fin de gestión específico vinculado con las condiciones del ecosistema”.
  
- Acreman y Dunbar (2004): “Cantidad o volumen de agua, por tiempo, requerido para mantener la salud del río en un estado particular predeterminado o acordado en base a compensar otras consideraciones”.
  
- *Environmental Flow Conference* (2007), Declaración de Brisbane: “Cantidad, periodicidad y calidad del caudal de agua que se requiere para sostener los ecosistemas dulceacuícolas, estuarinos y el bienestar humano que depende de estos ecosistemas”.

Este último concepto fue desarrollado durante la Conferencia de Caudales Ambientales de 2007, realizada en Brisbane, Australia, donde participaron más de 750 científicos, economistas, ingenieros, gestores del agua y autoridades de más de 50 países.

Como puede observarse, en sus inicios el caudal ecológico era considerado como una cierta cantidad de agua necesaria para mantener los

recursos acuáticos fluviales. Las primeras aproximaciones, se centran en una cantidad mínima de agua que permita asegurar el mantenimiento de especies acuáticas o la dilución de contaminantes.

Posteriormente, se reconoce que todas las variables participantes de las variaciones temporales (inter-anales e intra-anales) son importantes, incluyendo caudales mínimos, intermedios y extremos (Acreman & Dunbar, 2004; Poff *et al.*, 1997). Es decir que el Régimen de Caudales Naturales debe ser considerado en la determinación del Caudal Ecológico.

El mantenimiento de la calidad del agua se menciona en las definiciones más recientes, como la que se desarrolló en el año 2007 durante la Declaración de Brisbane. También se observa que varios autores (Dyson *et al.*, 2003; Tharme, 2003), así como la Declaración de Brisbane, incluyen a otros ecosistemas acuáticos como los humedales, estuarios, sistemas costeros y otros vinculados, además de los ríos.

Es interesante notar que los conceptos más recientes no solo se centran en los requerimientos que permiten mantener al ecosistema, sus funciones y la conservación de especies acuáticas, sino que incluyen aspectos socioeconómicos, como es la protección de los valores científicos, culturales, recreacionales y el mantenimiento de los bienes y servicios ecosistémicos (Kendy *et al.*, 2012; Tharme, 2003). En estos conceptos más holísticos, muchos autores prefieren cambiar el término de Caudales Ecológicos a Caudales Ambientales, lo cual es tratado en el siguiente capítulo.

De esa manera, se podría decir que los conceptos más actuales dirigen al Caudal Ecológico o Ambiental como una herramienta de gestión ambiental (Dyson *et al.*, 2003).

#### **4.1.4 CAUDAL ECOLÓGICO Y CAUDAL AMBIENTAL**

Los conceptos indicados anteriormente, especialmente los más recientes, destacan algunos aspectos que incluyen el valor socioeconómico de la biota acuática y de las funciones ecosistémicas, e inclusive mencionan a la participación social (Acreman y Dunbar, 2004; Dyson *et al.*, 2003). Es decir, estas apreciaciones llegan a un nivel de análisis holístico que toma en cuenta al ecosistema con su conjunto total de variables ambientales (físicas, bióticas y socioeconómicas). De esa manera, el concepto de Caudal Ecológico involucra diferentes enfoques científicos y profesionales. Se podría entonces decir que el Caudal Ecológico forma parte del Caudal Ambiental.

Dyson y colaboradores (2003) subrayan que “el Caudal Ambiental provee contribuciones importantes para la salud del río, el desarrollo económico y el alivio a la pobreza, además de que asegura la disponibilidad continua de los varios beneficios que un río saludable y acuíferos dan a la sociedad”.

El establecimiento de un Caudal Ecológico puede reducir la disponibilidad de agua destinada a usos económicos y sociales, mientras que un Caudal Ambiental busca un consenso entre las demandas de agua actuales y futuras, y

la conservación y protección de la biota acuática. Por esa razón, la determinación de los Caudales Ambientales debe considerar necesariamente la participación social y acuerdos con las comunidades.

Según ciertos estudios (Dyson *et al.*, 2003; Kendy *et al.*, 2012) los Caudales Ecológicos y Ambientales son una herramienta de gestión de cuencas hidrográficas que puede ser aplicada en la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH). Generalmente, la aplicación de esta herramienta está relacionada al uso de los recursos hídricos para beneficio del ser humano; por lo tanto, su objetivo es determinar la cantidad de agua que puede ser extraída de un río sin sobrepasar los límites que afecten severamente el ecosistema acuático. Sin embargo, algunos autores consideran que debería realizarse estudios de Caudales Ecológicos y/o Ambientales en cualquier río, sin que necesariamente esté sometido a transformaciones (King *et al.*, 2003).

#### **4.1.5 RÉGIMEN DE CAUDAL ECOLÓGICO**

Con la evolución de los conceptos de Caudal Ecológico, otros aspectos hidrológicos empieza a incorporarse por considerarlos importantes para los ciclos de vida de las especies, como es el Régimen Hidrológico (o Régimen Natural de Caudal). Éste se define como el conjunto de “variaciones del estado y de las características de una masa de agua que se repiten de forma regular en el tiempo y en el espacio y que muestran patrones estacionales o de otros tipos” (World Meteorological Organization, 2012).

En otras palabras, el Régimen Hidrológico está relacionado con la fluctuación entre caudales máximos y mínimos (ordinarios y extraordinarios) que se presenta en un lapso de tiempo determinado, por ejemplo un año.

El Régimen Hidrológico es dependiente de factores como el clima, geología, hidromorfología, longitud y tamaño, red de drenajes, suelos, topografía, vegetación, entre otros. Cambios ocurridos en cualquiera de éstos parámetros pueden afectar la infiltración hídrica, los niveles freáticos y las tasas de escorrentía; los cuales a su vez modifican la variación temporal de caudales (Izquierdo y Madroñero, 2014; Martínez y Fernández, 2008). Desde el punto de vista ecológico, el Régimen Hidrológico es condicionante de la biodiversidad.

Los caudales altos y bajos son muy importantes para la formación de los diferentes hábitats, sitios de refugio y de guardería, así como secciones de descanso, necesarios para varias especies de peces y otra biota acuática. Estos también son relevantes para el buen estado de las riberas, pues permiten el desarrollo de la vegetación de orilla que está adaptada a los cambios extremos, gracias a que poseen ciclos de vida rápidos y colonizan fácilmente. En las crecidas las semillas se movilizan y en los caudales bajos éstas desarrollan. Como consecuencia, los bosques de galería cumplen la función de protección de inundaciones (Castro *et al.*, 2006; Diez, 2010).

Para muchas especies acuáticas, los caudales extremos dan la señal para iniciar las épocas de reproducción, desove, incubación, momentos migratorios o movilizaciones verticales y horizontales. Por lo tanto, cualquier alteración del

Régimen Hidrológico produce efectos sobre los ciclos de vida de las especies. (Diez, 2010).

Las crecidas de caudal permiten la remoción de sedimentos, evitando así la acumulación en ciertos sectores y el taponamiento de áreas intersticiales, y la movilización de nutrientes de un sector del río a otro. Es decir que las variaciones de caudal, renuevan constantemente las condiciones del río (Diez, 2010).

Como indicaron Diez y colaboradores (2006), las variaciones de caudal en la escala espacio-temporal, favorecen los procesos ecológicos fundamentales de las cuencas hídricas, que son: (i) conectividad, disponibilidad y persistencia de los hábitats fluviales; (ii) mantenimiento de los niveles de interrelaciones entre las especies (ej. competencia, primacía); y (iii) las tasas de ingreso, flujo y transformación de la materia orgánica y los nutrientes.

Por lo expuesto, para cualquier evaluación del estado de conservación e integridad de un río, el Régimen Hidrológico es uno de los elementos más significativos (Izquierdo y Madroño, 2014). Por esa misma razón, muchos autores consideran que los estudios de Caudal Ecológico deben incluir como aspecto determinante al Régimen Hidrológico, como se observa en algunos de los conceptos indicados anteriormente.

De esa manera nace el término Régimen de Caudal Ecológico al “caudal que se debe dejar correr en una fuente hídrica después de un aprovechamiento hidráulico, al presentarse la modificación del régimen natural, con el propósito de

mantener las funciones y dinámicas ecológicas de las diferentes comunidades de organismos bioacuáticos presentes en un ecosistema fluvial” (Izquierdo y Madroño, 2014).

Según Izquierdo y Madroño (2014), las variables asociados al régimen de caudales, y que son importantes de analizar son: (i) la magnitud, (ii) la frecuencia, (iii) la duración, (iv) la predictibilidad y (v) la variabilidad; estos se definen a continuación:

- Magnitud.- La cantidad de caudal que discurre por una sección del río, en un momento específico.
- Frecuencia.- El intervalo de tiempo en el que el caudal circulante supera un valor específico.
- Duración.- El período de tiempo asociado a una condición determinada de caudal.
- Predictibilidad.- Regularidad con que se presenta un determinado caudal que puede ser predecible.
- Variabilidad.- Tasa de variación de caudal de una magnitud a otra.

Como se expresa en Martínez y Fernández (2008): “el éxito en la conservación de la biodiversidad y funcionalidad de nuestros ríos, depende de nuestra capacidad de proteger o restaurar los principales aspectos del régimen

natural de caudales, y de conocer cómo las variables hidrológicas e hidráulicas interactúan con los procesos biológicos, controlando la composición en especies y la funcionalidad de los distintos componentes del ecosistema”.

Complementando lo anterior, Gippel y Stewardson (1998) expresan que el establecimiento de únicamente un caudal estático no es suficiente como para lograr la supervivencia de la biota acuática, por lo que debería descartarse.

## **4.2 IMPORTANCIA DEL CAUDAL ECOLÓGICO**

### **4.2.1 BIOTA ACUÁTICA**

El ecosistema fluvial está compuesto por una intrincada red trófica, cuya base está formada por organismos fotosintéticos, como las algas, al nivel de productores primarios (Gómez *et al.*, 2009). Existe una gran variedad de estos organismos dulceacuícolas, de características eucariotas o procariotas, microscópicas o macroscópicas, unicelulares o filamentosas, otras se asocian para formar colonias visibles. Ejemplos de estos microorganismos son las cianofitas (o cianobacterias), clorofitas (algas verdes), rodofitas (algas rojas) y bacillariofitas (diatomeas). Este último es el grupo más numeroso en los ríos. Algunas microalgas viven libres en la masa de agua (fitoplancton) y otras viven en los sustratos o bentos.

Las algas bentónicas pueden estar adheridas a diferentes sustratos, como rocas y piedras, limo, arena o sobre vegetación sumergida (viva o muerta). Es

decir que las algas poseen estrategias oportunistas que les permiten ocupar diversos hábitats, con altas tasas de renovación (Gómez *et al.*, 2009). Este grupo biótico ha sido utilizado como un indicador de calidad del agua, pues cuando los ríos están enriquecidos por nutrientes, la densidad de algas puede ser muy alta.

Principalmente en la zona béntica del río, encontramos la mayor densidad de consumidores primarios, los cuales están constituidos principalmente por los denominados macroinvertebrados bénticos acuáticos (o macrobentos). Éstos son seres que viven en los substratos de los ríos, debajo de los sedimentos, sobre materia orgánica en descomposición (hojas de plantas, troncos, ramas, etc.) o entre la vegetación acuática. Éstos constituyen el alimento principal de los peces y forman una comunidad que se compone de insectos, larvas acuáticas de insectos, lombrices de agua, ácaros de agua, sanguijuelas, planarias, caracoles, cangrejos, entre otros (Jacobsen *et al.*, 1997).

Estos seres han sido bastante estudiados en cuanto a su sensibilidad y resistencia a aguas contaminadas, principalmente de carácter orgánico con su respectiva disminución del oxígeno disuelto en el agua. Se han logrado desarrollar índices que permiten dar indicios de la calidad del agua de un determinado sistema hídrico mediante la riqueza y abundancia de este grupo biótico. Sin embargo, en lo que se refiere al conocimiento de sus ciclos biológicos y requerimientos de caudal, la cantidad de estudios se reduce, especialmente en América Latina (Carrera y Fierro, 2001; Roldán y Ramírez, 2010).

Sobre este nivel trófico están otros seres vivos acuáticos, como los peces de agua dulce, cuya diversidad mundial está estimada en unas 14.000 especies (Anderson *et al.*, 2010). Sin embargo, la diversidad íctica es mayor en las zonas más bajas. En ríos altoandinos, por ejemplo, son muy pocas las especies existentes, y principalmente se refieren a grupos adaptados a bajas temperaturas, como algunas especies de la familia Astroblepidae, denominadas comúnmente en Ecuador como preñadillas.

En los ecosistemas fluviales otro nivel trófico importante es el de los descomponedores y de los detritívoros. Cualquier material orgánico que cae al agua, es primeramente lixiviado y ciertos componentes disueltos por procesos químicos y físicos. Simultáneamente, el material es ocupado por organismos descomponedores como hongos y bacterias, quienes lo acondicionan para hacerlo accesible para los organismos detritívoros; acción realizada principalmente por algunos macroinvertebrados. Los detritívoros fragmentan la materia orgánica y la hacen más fina, la cual se agrega al sustrato. Este es un período de intensa actividad biológica (Pozo *et al.*, 2009).

#### **4.2.2 EL RÍO CONTINUO**

En los ecosistemas fluviales se producen cambios en la composición de las comunidades bióticas y sus interacciones ecológicas desde su nacimiento hasta su desembocadura, influenciados por los cambios hidrogeomorfológicos. A este efecto Vannote y colaboradores (1980) lo denominaron como Río Continuo.

Generalmente, los tramos de los ríos ubicados en las zonas más altas (órdenes 1 a 2), contienen aguas con bajas temperaturas, alto contenido de oxígeno, turbiedad, nutrientes y niveles reducidos de sólidos disueltos (baja conductividad). En estos tramos, la producción primaria es baja, pero se presentan grandes aportes de materia orgánica vegetal, por lo que los macroinvertebrados dominantes son detritívoros, trituradores y colectores. La diversidad de esta comunidad es alta. Los peces existentes son predadores en su mayoría, y su tamaño es pequeño, en relación a peces de las zonas bajas; su biodiversidad es reducida (Roldán y Ramírez, 2010; Smith y Smith, 2007; Vannote *et al.*, 1980).

En los tramos medios de la cuenca (órdenes 3 y 4), la temperatura del agua aumenta, la oxigenación es aun relativamente alta, así como la turbiedad, la concentración de nutrientes y la conductividad. La productividad primaria aún se mantiene reducida y aún el ingreso de materia orgánica de origen vegetal ribereño es alta. Las cadenas tróficas se mantienen similares a la sección anterior pero incrementan las especies de ramoneadores. La diversidad de macroinvertebrados disminuye un poco, en cambio la de peces aumenta en relación a las partes altas (Roldán y Ramírez, 2010; Smith y Smith, 2007; Vannote *et al.*, 1980).

En los tramos bajos (órdenes 5, 6 o más), las condiciones se vuelven muy diferentes a las anteriores; la temperatura incrementa, puede reducirse bastante el oxígeno y las aguas volverse bastante turbias. Se incrementa la productividad primaria porque hay elevada cantidad de nutrientes. La materia orgánica se acumula, por lo que la diversidad de organismos descomponedores es alta. La

carga de sólidos disueltos igualmente es alta por lo que aumenta la conductividad. La diversidad de macroinvertebrados se reduce, pero aumenta la de peces. Los tamaños de estos últimos también son mayores (Roldán y Ramírez, 2010; Smith y Smith, 2007; Vannote *et al.*, 1980). Una esquematización del Río Continuo se presenta en la Figura 2.

Conocer esto es importante porque las intervenciones en los ecosistemas fluviales modifican los patrones de distribución de las comunidades bióticas del Río Continuo (Smith y Smith, 2007).

#### **4.2.3 LAS INTERVENCIONES EN LOS ECOSISTEMAS FLUVIALES**

Desde épocas muy antiguas, las civilizaciones transformaron los ríos para satisfacer sus necesidades y muchas poblaciones se desarrollaron a lo largo de ríos; por ejemplo, egipcios y sumerios dependieron de grandes cauces hídricos como el Éufrates, el Nilo y el Tigris, para obtener agua para su uso y consumo, transporte y riego (Barrow, 1998; Molle *et al.*, 2007). Con los avances tecnológicos, los ríos fueron usados para nuevos fines, como proveedores de energía eléctrica, distribución y provisión de agua potable, entre otros. Hasta la actualidad, se han construido embalses, reservorios y estructuras para control de inundaciones, y el agua ha sido captada y distribuida a través de canalizaciones.

Sin embargo existen consecuencias significativas. Homa y colaboradores (2005) indican que debido a estas intervenciones, importantes ríos ya no llegan hasta su desembocadura natural, han perdido su conectividad con zonas

inundables, se han fragmentado, han disminuido la velocidad de la corriente; incluso pequeños y medianos ríos se secaron completamente o en una sección de su longitud total.

Las principales intervenciones ocurridas en los cauces hídricos están relacionadas a cambios en los siguientes aspectos (Vélez y Ríos, 2004):

- a) El régimen de caudales: aumento del caudal por trasvases, sustracción de una cantidad constante de agua, barreras para un almacenamiento de agua en zonas inundables, represamiento del agua en embalses o tanques, entre otros.
- b) El cauce: aislamiento de las márgenes por estructuras artificiales, alineamiento de las curvaturas normales del río, creación de embalses, desecación de humedales, ocupación de llanuras de inundación y orillas con infraestructura, entre otros.
- c) La calidad del agua: cambios en el uso de suelo de la cuenca para agricultura y ganadería, deforestación, desalojo de desechos sólidos y líquidos, explotación de material de construcción, minería, pavimentación, urbanización, entre otros.
- d) La biodiversidad acuática: alto tráfico en la navegación, cambio climático, construcción de barreras (ej. represas) que producen desconectividad y aislamiento, contaminación orgánica, química, térmica y por partículas

sólidas, lavados de embalses con altos niveles de sedimentos, sobrepesca y todos los demás cambios hidrológicos, químicos e hidromorfológicos mencionados anteriormente (Vélez y Ríos, 2004).

#### **4.2.4 EFECTOS ECOLÓGICOS DE LAS INTERVENCIONES**

La velocidad de la corriente y el caudal (i) determinan el tipo y estructura de sedimentos a lo largo del corredor fluvial, (ii) influyen sobre los regímenes subterráneos, y (iii) determinan las características de las comunidades bióticas que se desarrollarán en ese sistema (Roldán y Ramírez, 2010).

Las intervenciones de captación y regulación de caudales tienen consecuencias ecológicas que difieren según las características del río y de su lugar geográfico de ubicación; pues dependen del tipo y nivel de alteración de los componentes del ecosistema fluvial y el grado de resiliencia ante dicho cambio. Díez (2011) considera que el impacto de una regulación de caudales puede llegar a tener consecuencias graves a nivel ecosistémico; lo que repercute sobre la biodiversidad y abundancia de las especies nativas de peces e invertebrados acuáticos, e incluso puede llevarlos a la mortandad masiva.

Generalmente, las intervenciones en los cauces hídricos modifican la *magnitud y frecuencia* de los caudales extremos (máximos y mínimos). En el caso de cambios repentinos de caudal (ej. una obra hidroeléctrica) podrían producirse impactos como: (i) acelerar el crecimiento de especies invasivas como algas y plantas acuáticas, (ii) afectar el metabolismo de muchos organismos acuáticos, especialmente cuando los cambios de caudal son repentinos, (iii) alterar el flujo de

energía en el sistema, (iv) desestabilizar el ciclo vital de las especies, (v) desplazar a las especies más vulnerables, (vi) favorecer el desarrollo de especies tolerantes a los cambios, y (vii) modificar la estructura de la zona béntica (Diez, 2011; Doyle *et al.*, 2005).

En el caso de una estabilización de los caudales (ej. embalses para riego), esto podría: (i) afectar el crecimiento y la regeneración de la vegetación de las márgenes por reducción de la magnitud y frecuencia de las inundaciones, (ii) favorecer la abundancia de algunas especies de peces introducidas, en detrimento de las nativas, y (iii) propiciar la invasión de la vegetación en las riberas, al aumentarse el área de colonización (Diez, 2011; Unión Europea, 2015).

También se producen importantes consecuencias ecológicas cuando ocurre una modificación de la *duración* de los caudales. Esto podría: (i) cambiar la estructura del bosque de galería e incrementar la mortalidad de los árboles, debido al prolongamiento del período de caudales de inundación, (ii) disminuir el área de refugio producido por la vegetación, (iii) fragmentar la conexión entre el cauce y las riberas, lo que trunca el crecimiento de la vegetación, (iv) limitar el hábitat disponible para las especies e incrementar su densidad, por el establecimiento de periodos más largos de caudales bajos, y (v) reducir zonas con presencia de rápidos, los cuales son necesarios para ciertos peces (Diez, 2011).

Cambios en la *predictabilidad* del régimen de caudales, perjudican de forma directa e indirecta sobre los organismos acuáticos. Esto podría: (i) afectar

las señales ambientales que reciben los peces para la época de desove, incubación o migración, si se eliminan eventos extremos altos o bajos, (ii) alterar el equilibrio trófico del ecosistema acuático, (iii) beneficiar a especies invasoras de ribera, lo que limita la regeneración del bosque de galería, y (iv) impedir el acceso de los peces a zonas de descanso y refugio (Diez y Burbano, 2007; Diez, 2011).

En relación a la *tasa de variación* de caudal, cuando ésta se modifica, podría: (i) arrastrar y aislar a los organismos acuáticos de menor movilidad, (ii) cambiar las características fisicoquímicas del agua, y (iii) reducir la probabilidad de germinación de especies de flora, especialmente en la zonas de inundación (Diez, 2011; García y González, 1998).

Considerando el aspecto geomorfológico, la regulación de caudales provoca procesos de erosión y sedimentación, lo que produce consecuencias negativas sobre la biota acuática y la vegetación de los márgenes. Además, esto altera el flujo de energía y los ciclos de nutrientes (Ballarín y Rodríguez, 2013; Diez, 2011). Desde el punto de vista social y económico, los cambios geomorfológicos que ocurren en la regulación de caudales afectan los servicios ecosistémicos de los ríos (SIWI, 2009).

#### **4.2.5 LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LOS RÍOS**

Según el *Millennium Ecosystem Assessment* (2007), los servicios ecosistémicos se definen como “los beneficios que la gente obtiene de los ecosistemas para su bienestar”. Todos los ecosistemas naturales, inclusive los acuáticos, producen servicios que no solo son valiosos desde el punto de vista

ecológico, sino también socioeconómico. Se pueden categorizar los servicios ecosistémicos en cuatro grupos: de aprovisionamiento, de regulación, de protección y socio culturales. De esa manera, los servicios que proveen los ríos poco intervenidos son (Dyson *et al.*, 2003; García y González, 1998; Verweij, 2002):

- Provisión de agua dulce para uso humano
- Abastecimiento de acuíferos
- Control de inundaciones y sequías
- Creación de hábitats para peces, aves y otra vida silvestre
- Fertilización de suelos durante épocas de inundación
- Mantenimiento de los microclimas locales
- Mantenimiento de los flujos de sedimento y ciclo de nutrientes
- Producción de sedimentos y control de la salinidad de estuarios
- Producción de alimentos (ej. pesquerías)
- Purificación de las aguas
- Recreación y turismo (ej. nado, kayak, rafting, velerismo, navegación)
- Sostenimiento de la biodiversidad acuática y terrestre

Los servicios de aprovisionamiento son los más representativos, pues son aprovechados de manera directa por la gente (el agua, por ejemplo, como recurso vital). Los servicios de regulación, son los menos visibles, pero son igualmente importantes. Por ejemplo, sin el proceso natural de purificación del agua no fuera posible disponer de agua limpia. También son significativos los servicios culturales, que incluyen sitios de belleza paisajística, recreacionales,

ceremoniales, a pesar de ser menos tangibles en comparación a la provisión de agua.

El bienestar humano es un término difícil de definir, pues representa cualquier hecho o bien que sea importante para la vida de cada ser humano. Esto incluye un amplio rango de elementos básicos para su supervivencia hasta logros personales y espirituales. Por lo tanto, el *Millennium Ecosystem Assessment* (2007), define el vínculo entre el bienestar humano y los servicios ecosistémicos en términos de seguridad, servicios básicos, salud física y mental, y buenas relaciones sociales. Por último, el bienestar humano depende no solo de uno, pero de una multiplicidad de servicios interrelacionados. Esto indica la importancia de mantener todos los servicios ecosistémicos para evitar rupturas en la interconexión entre los mismos.

El régimen natural de caudales es importante para las pesquerías, pues están relacionadas con los ciclos de vida de las especies: migraciones, desarrollo de juveniles, fecundación, desove, nacimiento (King *et al.*, 2008).

El calendario agrícola, especialmente en las zonas bajas de las cuencas, donde se presentan inundaciones, también dependen de las fluctuaciones de caudal; pues los agricultores aprovechan las épocas de descenso de las aguas para usar esas tierras, cuya fertilidad ha sido renovada durante la inundación. Las intervenciones en el régimen de caudales rompen los ciclos normales de inundación y nutrientes (Bradley *et al.*, 2012; NEWVI, 2011). Inclusive, los caudales regulados y captados pueden favorecer el desarrollo de enfermedades y

pestes (malaria, dengue, cólera), al cambiar la biodiversidad acuática (Arthington *et al.*, 2004).

Desde el punto de vista cultural, los ríos tienen no solo un valor escénico, pero también espiritual y arqueológico. Existen numerosos ejemplos de relaciones entre los cauces hídricos y las comunidades humanas; festividades culturales y religiosas se realizan en los ríos, además de la pesca (DFO, 2013; SIWI, 2009). En los altos Andes es conocido que en torno a los ríos se realizan festividades, limpias y rituales espirituales y culturales.

#### **4.2.6 LA CALIDAD DEL AGUA Y LOS CAUDALES**

La expresión *Calidad del Agua* indica una valoración que se le da al líquido vital en relación a parámetros (físicos, químicos, biológicos u otros) que determinan sus características, en la medida en que los mismos se encuentran en niveles aceptables, sea para sostener la vida o algún otro objetivo (ej. natación). Por eso, la calidad del agua es relativa y depende de los objetivos del análisis que se realicen, pues las concentraciones de los parámetros indicados no son los mismos para aguas destinadas al uso humano, a riego, a recreación, preservación de fauna acuática, entre otros (Mitchell y Stapp, 1993).

Existen normas nacionales e internacionales para ciertos parámetros, dependiendo de dichos objetivos. También existen índices de calidad del agua, que se calculan en base a las concentraciones de varios parámetros seleccionados como los más importantes, que también dependen de esos

objetivos de análisis. Por lo general, se utilizan índices generados a partir de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, u otros establecidos mediante indicadores biológicos (Mitchell y Stapp, 1993).

Los índices físicoquímicos y bacteriológicos utilizan parámetros que pueden ser medibles en un laboratorio, a través de la toma de muestras de agua que se desea analizar su calidad. Los parámetros básicos, es decir que casi siempre se incluyen en los análisis de calidad del agua son: oxígeno disuelto, temperatura, pH. Sin embargo, dependiendo del objetivo del análisis, se incluyen otros parámetros como, por ejemplo, conductividad eléctrica, nutrientes (fósforo, nitrógeno y sus compuestos), minerales (calcio, magnesio y sus compuestos), metales pesados (hierro, mercurio, níquel, etc.), pesticidas, hidrocarburos y derivados de ellos, coliformes fecales, entre otros (Mitchell y Stapp, 1993).

En definitiva, se pueden analizar todos los elementos, compuestos y sustancias químicas de la tabla periódica que se deseen, así como microorganismos, dependiendo del objetivo. Por ejemplo, si el análisis está dirigido a saber si el río está contaminado con desechos de actividades mineras auríferas, es importante el análisis de mercurio, cianuro y otros metales pesados. Si se desea conocer si existe contaminación orgánica o por aguas servidas, se podrán realizar análisis de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos como: Demanda Biológica de Oxígeno, nitratos, fosfatos, coliformes fecales, entre otros.

Dentro de los índices basados en indicadores biológicos, entre los más utilizados está el fitoplancton y los macroinvertebrados acuáticos bénticos. Estos

se basan en el nivel de sensibilidad o tolerancia de estos grupos biológicos a los contaminantes o intervenciones en el ecosistema fluvial. Por lo general, los macroinvertebrados son los favoritos, pues tienen largos ciclos de vida en el agua, reflejando así no solo el estado presente de un cauce sino también las condiciones pasadas del mismo. Entre estos existen grupos sensibles a la contaminación (especialmente orgánica), mientras que otros la toleran, desarrollándose en grandes poblaciones. Por esa razón, su presencia, ausencia, densidad, diversidad y riqueza, se usan frecuentemente para evaluar la salud del ecosistema acuático (Carrera y Fierro, 2001).

Los datos sobre la calidad del agua son importantes para la determinación del estado actual del río, fuentes y niveles de contaminantes, lo que permite proponer e implementar medidas de recuperación del ecosistema acuático y de protección de la salud de los usuarios y de los organismos que habitan y dependen del agua.

Una reducción de caudal está acompañado de una disminución de la calidad del agua: aumento de temperatura por una más alta exposición a los rayos solares, mayor acumulación de materia orgánica con una más alta descomposición de la misma, disminución del oxígeno del agua, concentración de elementos y sustancias químicas y una menor facilidad de auto-recuperación del río (Samboni *et al.*, 2011).

Esta disminución de la calidad del agua, en condiciones normales se encuentra dentro de los límites tolerables de la biota acuática; es decir que ésta

se encuentra también adaptada a estas variaciones estacionales de calidad del agua. En aguas contaminadas entonces la reducción del caudal puede significar una gran amenaza para la biodiversidad y para los usuarios. De esa manera, la calidad de agua permite determinar la sensibilidad del sistema ante los cambios (Roldán y Rodríguez, 2010; Verwieij, 2002).

#### **4.2.7 LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS**

El manejo integrado de los recursos hídricos es una herramienta de gestión, que asegura el sostenimiento de la calidad, cantidad y el régimen de caudales naturales, los cuales son necesarios para mantener la funcionalidad ecológica del sistema acuático, que se traduce en bienes y servicios ecosistémicos.

En ese sentido, la Gestión Integrada de Recursos Hídricos y el Caudal Ambiental buscan un objetivo común: una integración de los requerimientos ambiental, económico y social del agua. Ambas herramientas de gestión coinciden en el reconocimiento de que los bienes y servicios de las cuencas hidrológicas dependen de los procesos biológicos, físicos y sociales; y que por lo tanto, es necesario buscar mecanismos para conservar los recursos hídricos y así garantizar su existencia futura (WWF, 2010).

### **4.3 METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS PARA DEFINIR EL CAUDAL ECOLÓGICO**

Actualmente existen muchos métodos y herramientas computacionales para calcular el Caudal Ecológico, que han sido desarrollados desde hace varios años en diferentes países. Muchos de estos tienen sus ventajas, pero también desventajas, pues cada uno está adecuado para condiciones particulares. De igual manera, no existe en el mundo una forma estandarizada de establecer un Caudal Ecológico, aunque algunos países tienen desarrollados procedimientos dentro de su legislación.

Antes de la década de los 60, ya empezaron a desarrollarse métodos de determinación matemática de un caudal mínimo, de mantenimiento, base o reducido, según el objetivo perseguido; pero estaban basados principalmente en los criterios de profesionales, pero sin una base técnica que los justificara. De esa forma es como empiezan a desarrollarse métodos para dar soporte a dichos juicios de expertos, y que permitan relacionar el mantenimiento del hábitat fluvial con los requerimientos de caudal.

A medida que el concepto de Caudal Ecológico va evolucionando, las metodologías también los hacen, hasta llegar a insumos sofisticados y acompañados de programas de computación. Para tener una referencia, en la década de los 80 ya se habían desarrollado más de sesenta métodos diferentes para determinar caudales mínimos, y en la actualidad se cuenta con

aproximadamente 200 métodos para calcular Caudales Ecológicos y ambientales (Diez, 2011).

Más adelante se presenta una recopilación de los métodos que han sido más frecuentemente utilizados y conocidos, que van desde un cálculo matemático simple, hasta métodos holísticos, multidisciplinarios y evaluativos. Obviamente, estos últimos requieren de un mayor tiempo de trabajo, un presupuesto bastante alto y la contratación de un equipo técnico amplio.

Consuegra (2013), Diez (2011), Dyson y colaboradores (2003) y Girard (2008), presentan una recopilación de diversas metodologías de cálculo de Caudales Ecológicos, clasificándolos de acuerdo a cuatro enfoques: (i) hidrológico, (ii) hidráulico, (iii) hidrobiológico y (iv) holístico. Existen muchas más metodologías propuestas, pero algunas poseen características en común, por lo que algunos métodos presentados agrupan a varios. A continuación, se presenta una corta explicación de cada uno de los métodos más conocidos y utilizados.

#### **4.3.1 MÉTODOS CON ENFOQUE HIDROLÓGICO**

La Hidrología es la “ciencia que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente” (Aparicio, 1992). Por lo tanto, los métodos hidrológicos de Caudal Ecológico ( $Q_e$ ) utilizan principalmente la serie histórica (hidrograma) de datos de caudales diarios, mensuales, anuales e interanuales y

establecen los valores máximos, medios y mínimos. A partir de estos datos, los especialistas en hidrología pueden optar por:

- Establecer un caudal aceptable mínimo o medio calificado.
- Calcular un porcentaje que puede estar preestablecido en normas.
- Calcular índices.
- Calcular un valor o valores mensuales en función de recomendaciones de caudal.

Por lo tanto, los métodos hidrológicos se basan generalmente en los datos obtenidos de tres tipos de curvas, como las indicadas en la Figura 3. Por lo general, los datos históricos utilizados tienen una extensión de unos 20 – 25 años o más, en lo posible, según la existencia de datos. A continuación se describen los métodos más conocidos y utilizados.

#### **Método de NGPRP (*Northern Great Plains Resource Program*) - 1974**

Método desarrollado en Estados Unidos (Aparicio, 1992; MADS / ANLA, 2013), pero especialmente para conservar peces salmónidos (económicamente importantes). En este caso, el Caudal Ecológico se lo calcula a nivel mensual para condiciones hidrológicas normales, a partir de los medios diarios de las Curvas de Duración de Caudales (CDC). La CDC es una gráfica que nos indica el porcentaje del tiempo en que los caudales han sido igualados o excedidos (frecuencia de su ocurrencia), como se observa en el Figura 4.

Este método considera el caudal que según la CDC está presente el 90% del tiempo ( $Q_{90}$ ) para los meses secos, y uno presente el 50% de tiempo ( $Q_{50}$ ) para los meses húmedos. Para el cálculo de Caudal Ecológico se requiere un histórico de flujos medios diarios para más de 20 años (Consuegra, 2013).

### **Método de Hoppe - 1975**

Este método también fue desarrollado en Estados Unidos y es uno de los primeros en considerar las características fluviales que son las más adecuadas para la fauna acuática, relacionándolas con los percentiles de la CDC (Brizga, 1998). De esa manera, se determinan cuáles son los flujos mínimos que se presentan durante los ciclos de vida de las especies, tal como se indica en la Tabla 1 (Diez y Burbano, 2007; Diez, 2011).

Sin embargo, este método fue desarrollado exclusivamente para ríos que contienen poblaciones de trucha, por lo que no es aplicable a todos los peces ni todos los ríos. Para este método se requieren los registros históricos de caudales diarios, mensuales o anuales, a nivel multianual (Castro *et al.*, 2006; Consuegra, 2013).

### **Método de índices CDC - 1976**

En este método también se elabora una CDC, para lo cual se requiere información sobre caudales diarios, mensuales o anuales. Con esta curva se puede determinar la relación existente entre ciertos rangos de caudales y el tiempo en el que cada uno de estos se iguala o excede. Considerando diferentes

condiciones hidrológicas, se aplican unos índices como los presentados en la Tabla 2 (Consuegra, 2013).

### **Método de Montana o de Tennant - 1976**

Este método muy popular fue igualmente desarrollado en Estados Unidos, para el cual se requiere como información de base al registro histórico de caudales medios mensuales multianuales (Castro *et al.*, 2006; Diez, 2011; García y González, 1998; Homa *et al.*, 2005; Parra, 2012; Pusey, 1998; Rebillard, 2006).

Para su aplicación es importante la información de dos períodos: caudal bajo y alto. Para cada uno de estos, el método propone determinar el caudal medio multianual, que depende del estado ecológico deseado, tal como se expone en la Tabla 3 (Arthington *et al.*, 2004; Bragg *et al.*, 2005; Consuegra, 2013; Diez y Burbano, 2007; ENDESA, 2009; Gippel y Stewardson, 1998; King *et al.*, 2008; Pinilla-Agudelo *et al.*, 2014).

### **Método 7Q10 - 1976**

Igualmente desarrollado en Estados Unidos, para el cual se requiere el registro histórico de caudales mínimos diarios multianuales. Éste calcula el valor de un caudal medio en cualquier evento de siete días seguidos de sequía, para un Período de Retorno de diez años (Consuegra, 2013; Diez y Burbano, 2007; King *et al.*, 2008; MADS / ANLA, 2013; Pinilla-Agudelo *et al.*, 2014; Rebillard, 2006).

El Período de Retorno es la probabilidad de que un caudal extremo con un valor X vuelva a ocurrir en un tiempo determinado (Aparicio, 1992). Este método proviene de una versión anterior, que consideraba un Período de Retorno de dos años, y se lo conocía como el método 7Q2 (Diez, 2011; ENDESA, 2009).

### **Método de Texas - 1979**

También fue desarrollado en Estados Unidos y utiliza el registro de caudales medios mensuales multianuales (Consuegra, 2013; Gippel y Stewardson, 1998; King *et al.*, 2008). El Caudal Ecológico en este caso, se define como el porcentaje de la mediana de los caudales medios mensuales para el período húmedo (0.6%) y seco (0.4%).

### **Método del caudal medio base (*Aquatic Base Flow*) - 1980**

Este método fue desarrollado por el Servicio de Vida Silvestre de Estados Unidos, el cual requiere la información de los caudales medios mensuales multianuales para una serie de registros de más de 25 años. Aquí el Caudal Ecológico equivale a la mediana de los flujos medios mensuales, pero para el mes más seco; asumiendo que las especies son capaces de tolerar esas características (Diez, 2011).

### **Método del código del medio ambiente francés - 1984**

Este método establece el valor correspondiente al 10% del caudal medio anual. Para este cálculo es necesario disponer de datos históricos de los caudales promedios anuales del río en cuestión, para un período mínimo de 5 años (Castro *et al.*, 2006; Consuegra, 2013; Diez y Burbano, 2007). Esta propuesta fue acogida incluso por otros países, entre los cuales estaba el Ecuador, quienes lo adoptaron en su normativa (ej. legislación Española, Irlandesa, Chilena).

### **Método de la legislación Suiza - 1993**

Este método calcula algoritmos en función de un caudal mínimo base y un complementario variable superado en 347 días del año (Q347), y hace diferencias entre los ríos piscícolas y no piscícolas. Para estos últimos, fija como caudal mínimo el 35% del Q347, siempre que este sea menor a 1 m<sup>3</sup>/s, sino 0,005 m<sup>3</sup>/s. En cambio, para ríos piscícolas se determinan valores del caudal mínimo en función del Q347 (Ver Tabla 4).

En el caso de que no exista la información de los caudales medios diarios, pero se tenga el caudal medio anual, la ley Suiza propone el empleo de una ecuación simplificada, para el cálculo del Q347. La legislación Asturiana también se basa en este método, pero establece sus propias ecuaciones, y está enfocado en la preservación de los ciclos de vida y migraciones de los peces salmónidos (*Salmo trutta* y *Salmo salar*), obviamente por su importancia económica (Consuegra, 2013; Diez, 2011).

### **Método RVA (*Range Variability Approach*) - 1996**

Este método fue igualmente desarrollado en Estados Unidos, con el objetivo de preservar la variabilidad hidrológica natural, y por ende la integridad y biodiversidad del ecosistema fluvial. El método pretende orientar el desarrollo de lineamientos, estrategias o políticas, para el manejo y gestión de cauces hídricos que están siendo regulados, especialmente por hidroeléctricas. Para su aplicación se establecieron 32 parámetros (ver Tabla 5), también denominados Índices de Alteración Hidrológica (IHA), y a partir de su análisis se determina el Caudal Ecológico.

Para aplicar este método se requieren los registros históricos de caudal (>20 años), los que permiten establecer el régimen hidrológico, previo a la construcción del proyecto. La variabilidad de los flujos es luego comparada con los registros que se tienen luego de la entrada en funcionamiento de la represa. Esto permite determinar el grado de alteración hidrológica, clasificado mediante cuatro niveles: severa, media, moderada y leve (Castro *et al.*, 2006; Consuegra, 2013).

### **Método de Hughes and Hannart - 2003**

Este método hidrológico fue desarrollado en Sudáfrica, en el que el Caudal Ecológico se expresa como porcentajes de la esorrentía media anual o MAR (por su acrónimo en inglés de *Mean Annual Runoff*). Para su estimación se

requiere clasificar al río dentro de alguna de las siguientes cuatro categorías, lo cual es realizado por expertos, autoridades o tomadores de decisiones, en función de algunos criterios predefinidos:

- Clase A: ecosistema fluvial no transformado
- Clase B: ecosistemas fluvial con pequeñas transformaciones
- Clase C: ecosistema fluvial con moderadas transformaciones
- Clase D: ecosistema fluvial sometido a severas transformaciones

Para su estimación se requiere calcular: (a) un coeficiente de variación de caudal mensual para las épocas húmedas, y (b) un coeficiente de variación de flujo mensual para las épocas secas. Teniendo estos valores, el método divide el promedio de a y b, para dar un Índice de Caudal Base o BFI (por su acrónimo en inglés de *Base Flow Index*), el cual es utilizado para estimar el Caudal Ecológico. La desventaja del método es que solo puede ser usado en los ríos sudafricanos (Castro *et al.*, 2006; Consuegra, 2013).

### **Método del Proyecto de Ley del Agua Colombiano - 2005**

En esta legislación colombiana, la determinación del Caudal Ecológico es hasta cierto punto flexible, pues permite la utilización de diferentes métodos, mientras sean aprobados por las autoridades ambientales; aunque el método seleccionado se debe regir a los criterios establecidos por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Sin embargo, la ley indica que mientras no se haya establecido de manera técnica el Caudal Ecológico y éste no sea aprobado, entonces se considerará al caudal que ocurra durante el 95% del año ( $Q_{95}$ ). Para determinar este porcentaje de permanencia, se requiere la serie de varios años de caudales diarios, mensuales o anuales, organizados en orden descendente, y la aplicación de las fórmulas establecidas en la legislación (Consuegra, 2013; MADS / ANLA, 2013; Pinilla-Agudelo *et al.*, 2014).

#### **4.3.2 MÉTODOS CON ENFOQUE HIDRÁULICO**

Los métodos hidráulicos también consideran la variación de los caudales, pero además lo relacionan con las características físicas del cauce, como el perímetro mojado ( $P$ ), la velocidad ( $V$ ), la profundidad de la lámina de agua ( $Y$ ), y la rugosidad del fondo (índice de Manning:  $n_s$ ), entre otras. Por lo general, los métodos hidráulicos utilizan modelos basados en el estudio sistemático de las características físicas en varias secciones transversales críticas del tramo del río en estudio. Los métodos hidráulicos se presentan a continuación.

##### **Método de Washington - 1972**

Este método está enfocado a la disponibilidad de hábitat para salmónidos y su ciclo de vida. Para su estimación se requiere obtener datos batimétricos en varias secciones transversales que sean representativas del tramo en estudio. Además se requieren datos de parámetros hidráulicos como velocidad de la corriente y profundidad del cauce, al menos para cinco caudales circulantes.

Estos datos permiten realizar mapas que caracterizan cada tramo para cada caudal, tales como: (i) profundidades, (ii) velocidades y (iii) profundidades y velocidades combinadas (Ver Figura 5). Éste último identifica las áreas preferenciales (o utilizables) por los peces salmónidos en relación a esos dos parámetros.

Cabe destacar que este grupo taxonómico íctico ha sido ampliamente estudiado por lo que se conocen las áreas preferenciales, lo que no ocurre con otras especies de peces. Dichas áreas utilizables son relacionadas con el caudal en ejes cartesianos logarítmicos, y son planimetradas (Ver Figura 5). El valor máximo corresponde al caudal óptimo para la especie, por lo que el caudal mínimo no deberá ser menor al 75% del mismo. Este método recomienda utilizar el cálculo del Perímetro Mojado, el cual se indica más adelante, cuando las preferencias de las especies son desconocidas (Diez, 2011; Diez y Burbano, 2007; ENDESA, 2009; Parra, 2012).

### **Método del perímetro mojado - 1976**

En hidráulica el Perímetro Mojado ( $P$ ) es la longitud de la línea de contacto entre el agua y la superficie mojada del canal (Chow, 2004). Es decir, es el contorno del área que está mojada. Este método ha sido uno de los más utilizados en Estados Unidos, y requiere para su análisis la información física (caudal, batimetría) de uno(s) transecto(s) en la sección del río que se está estudiando. El método analiza la relación ( $x$ ,  $y$ ) del caudal con el perímetro

mojado, y localiza el punto de inflexión, que es donde el valor del caudal ( $x$ ) inicia un cambio en la curvatura (Ver Figura 6); (Arthington *et al.*, 2004; Bragg *et al.*, 2005; Consuegra, 2013; Diez, 2011; ENDESA, 2009; Gippel y Stewardson, 1998; King *et al.*, 2008).

Es decir, que el método asume que el punto de inflexión de la relación caudal / perímetro mojado, es el equivalente al hábitat preferencial de la biota acuática que viven en el río estudiado. Este método generalmente analiza las secciones de rápidos, pues asume que si estos sectores del río son habitables, más aún lo serán las demás secciones. Este método es más aplicable en ríos anchos, poco profundos y geometrías del perímetro mojado más o menos regulares (Pusey, 1998; Bradley *et al.*, 2012; Castro *et al.*, 2006; Diez y Burbano, 2007; Dyson *et al.*, 2003; García y González, 1998; Izquierdo y Madroño, 2014; Rebillard, 2006).

### **Método de Waters - 1976**

Se basa en el método de Washington, pero a diferencia utiliza cuatro variables en vez de dos: velocidad de la corriente, profundidad, sustrato y cobertura vegetal, utilizando coeficientes entre cero y uno. La preferencia total en cada punto la calcula como el producto de cuatro coeficientes. A partir de las mediciones de las variables en muchos puntos de cada sección para varios caudales, evalúa la idoneidad del hábitat en cada punto mediante coeficientes de preferencia, calcula la anchura útil en cada caudal circulante (Diez, 2011; King *et al.*, 2008).

### **Método de múltiples transectos - 1976**

Se trata de una modelación hidráulica, y requiere la selección sistemática de varias secciones transversales para conocer las características físicas del ecosistema fluvial. De esa manera, en cada sección se mide la cobertura vegetal, forma del fondo, el nivel del agua y la velocidad de la corriente. La modelación permite determinar los cambios de estas características según las variaciones de caudal. El modelo asume que el caudal más favorable o el ecológico es el que garantiza el movimiento libre de las especies, la calidad del agua, el transporte de sólidos y posibilita la recreación (Arthington y Zalucky, 1998; Castro *et al.*, 2006; Consuegra, 2013; King *et al.*, 2008; Pusey, 1998).

### **Método de Idaho - 1976**

Este fue desarrollado en Idaho, Estados Unidos, de ahí su nombre. En este caso, el método busca establecer caudales recomendables en vez de mínimos, según diferentes objetivos. Para su aplicación se requiere conocer las características del cauce como profundidad, tipo de sustrato, velocidad de la corriente y topografía, en diferentes secciones transversales. Con esta información se modelan escenarios de simulación, según los diferentes objetivos: necesidades de hábitat para fauna acuática, flora, alguna especie de interés; los resultados de estos escenarios son luego comparados para establecer los caudales recomendables (Consuegra, 2013).

### **Método de modelación de simulación hidráulica de White - 1976**

Este método está más enfocado a las condiciones aceptables de migración, desarrollo, reproducción y freza de especies de peces de interés. Al igual que los demás métodos anteriores, se utilizan secciones transversales, en donde se define la relación algebraica entre el caudal circulante y el perímetro mojado. El Caudal Ecológico es aquel que se determina como aceptable para el ciclo de vida de las especies (Consuegra, 2013; García y González, 1998).

#### **4.3.3 MÉTODOS CON ENFOQUE HIDROBIOLÓGICO (ECOHIDROLÓGICO - ECOHIDRÁULICO)**

Estos métodos se basan en nuevos paradigmas en la comprensión ecosistémica de un río, denominados Ecohidrología y Ecohidráulica, que son disciplinas complementarias a la Hidrobiología (Diez, 2011). Estas recientes disciplinas permiten tener una mejor comprensión de la ecología de los ecosistemas lénticos y lóticos, donde rigen las fuerzas físicas, la hidromorfología y las escalas espaciales y temporales (Poff *et al.*, 2009; Poff *et al.*, 2010); la biodiversidad acuática se relaciona con estos aspectos. Los siguientes métodos presentados a continuación, combinan criterios de la Hidrobiología, Hidrología e Hidráulica.

### **Método IFIM (*Instream Flow Incremental Methodology*) - 1978**

Definitivamente, este es el método más popular entre los investigadores de Caudal Ecológico. Se basa en el de Waters, indicado anteriormente, y utiliza datos biológicos, hidráulicos e hidrológicos. Analiza los resultados de los cambios de caudal sobre la disponibilidad de hábitats para las especies presentes, la estructura del cauce, la calidad química y la temperatura del agua. Para este es necesario realizar un estudio todas estas características en una serie de secciones transversales ubicadas de forma sistemática. Con la información obtenida se realiza una simulación hidráulica predictiva que modela el tramo estudiado a nivel de profundidades y velocidades para un rango de caudales predefinidos (Arthington *et al.*, 2004; Bragg *et al.*, 2005; Diez y Burbano, 2007; Gippel y Stewardson, 1998; King *et al.*, 2003; King *et al.*, 2008; Parra, 2012).

Para el modelo, se requiere información de las curvas de preferencia de hábitat de la(s) especie(s) acuática(s) seleccionadas para el análisis y existentes en el tramo de estudio; lo cual no siempre está disponible. Es incluso posible incluir información sobre las preferencias de hábitat de las especies acuáticas en sus diferentes estadios de vida (adulto, juvenil, alevín).

Por lo tanto, la modelación del método IFIM unifica la simulación de profundidades y velocidades con las curvas de preferencia de la(s) especie(s) objetivo. De esa manera se obtiene un “Índice de Hábitat (IH)”, que indica cuales son los caudales ecológicos apropiados para la subsistencia y desarrollo de la(s) especie(s) en estudio.

Además el método elabora una curva que relaciona el índice del hábitat con el caudal (ver Figura 7), donde se determinan los puntos de inflexión que corresponden a los caudales mínimos permisibles para la(s) especie(s) objetivo (Consuegra, 2013; Dyson *et al.*, 2003; ENDESA, 2009; Grown, 1998; Pusey, 1998).

Para obtener estos resultados se requiere primeramente un estudio de la riqueza biológica del tramo estudiado, que permita seleccionar la(s) especie(s) o grupo(s) taxonómico(s) objetivo. La selección estará sujeta a criterios profesionales que deberán definirse; por ejemplo, la especie más abundante, la más vulnerable, en peligro, la más consumida por las comunidades, la más importante en términos económicos, entre otros. Aparte de esto, se requiere información en cada sección transversal tal como: la batimetría del cauce, profundidad, topografía y velocidad de la corriente media. Para facilitar la modelación, se ha desarrollado un paquete informático denominado IFIM-PHABSIM, presentado por el *U.S. Geological Survey* (USGS), que se puede acceder en su página web (Castro *et al.*, 2006; Diez, 2011; García y González, 1998; Girard, 2008; Izquierdo y Madroñero, 2014; NEWVI, 2011; Rebillard, 2006).

### **Método de biomasa de Wyoming - 1982**

Este modelo se enfocó a los peces salmónidos, especialmente en los ríos del estado de Wyoming (USA). Trabaja con regresiones múltiples de variables independientes, relacionando la biomasa (Kg/ha) con: el ancho del cauce, el

caudal al final de la época de estiaje, la cobertura de la vegetación, la concentración de nitratos, la erosión de las orillas, la temperatura del agua, el tipo de sustrato, la variación anual de caudal y la velocidad del agua.

Para su implementación se requiere datos sobre biomasa de salmónidos, batimetría, caudales históricos anuales, cobertura vegetal ribereña, composición del suelo de las orillas, concentración de nitratos y variación de temperatura (Consuegra, 2013; Diez y Burbano, 2007; Diez, 2011).

### **Método RECE (Régimen Estacional de Caudales Ecológicos) – 1997**

Este método también considera los procesos hidráulicos, hidrobiológicos e hidrológicos, y para su implementación requiere primeramente determinar el período de tiempo mínimo (mes, estación, etc.) necesario para la estimación del Caudal Ecológico; además de ajustar la función estadística de distribución de la serie de caudales del período determinado, sean estos aforados o simulados.

Adicionalmente, se requiere identificar el primer punto de inflexión de la curva de distribución de caudales, que corresponde al caudal ecológico de cada periodo. Finalmente, es necesario relacionar las características biológicas y fisicoquímicas del río con el caudal de cambio, mediante una modelización hidráulica.

Las características biológicas y fisicoquímicas que se deben considerar son: (i) la vulnerabilidad del cauce a flujos continuos por la captación de agua; (ii)

ciclos de inundación de las riberas que permite la funcionalidad del bosque de galería; (iii) capacidad de mantenimiento de la riqueza de especies acuáticas (peces e invertebrados) y anfibias; (iv) probabilidad de existencia de la(s) especie(s) acuática(s) objetivo frente a un valor de cierta variable física y química, que se determina mediante un Índice de Calidad de Hábitat (ICH).

El ICH es el equivalente del Índice de Hábitat (IH) del método IFIM, pero con ciertas diferencias: (i) agrega parámetros químicos (oxígeno, calcio, nitratos, amoníaco, fósforo, etc.), además de los físicos hidrológicos; (ii) las curvas se obtienen aplicando el método estadístico de Transformaciones de Box-Cox y no regresiones polinómicas.

Para aplicar este método se requiere el registro histórico de caudales diarios, mensuales o anuales, batimetría, planos de inundación, cobertura vegetal ribereña, riqueza de invertebrados, peces y anfibios y selección de la especie o comunidad biótica de interés (Consuegra, 2013).

### **Método de geomorfología de Thoms y Sheldon - 2002**

Este método utiliza incluye otras herramientas de interpretación geográfica como fotografías aéreas, imágenes satelitales, de escaneo láser (ej. Lidar) o de drones, para el análisis físico del sistema. Esta información permite, entre otras cosas, conocer la geomorfología del río, la conectividad longitudinal y lateral, sectores inundables y los tipos de intercambios verticales. Además, se requiere conocer el régimen de los caudales e información ecológica que permita

caracterizar el sistema acuático. Estos datos deben estar disponibles para secciones transversales representativas, en las cuales se determina la relación hábitat-caudal.

Mediante modelación se analizan los efectos de la captación del agua sobre las características hidrográficas, lo que permite determinar los cambios hidrográficos multitemporales; por ejemplo, a 10, 20, 50, 100 años o más. Esta modelación permite incluso incluir las variaciones predictibles de cambio climático.

Con este análisis, es posible proponer opciones de manejo del caudal, de manera que no se afecten las zonas imprescindibles para el adecuado funcionamiento ecológico acuático; así como el caudal que puede ser extraído (Consuegra, 2013; Chávez y González, 2015; Parra, 2012).

### **Método de Límites Ecológicos de las Alteraciones Hidrológicas (ELOHA) -2008**

Este método puede ser utilizado en casos en que no existen posibilidades de realizar estudios detallados y es considerado bastante acertado técnicamente, pues se basa en información generada por un sinnúmero de estudios ecohidrológicos. Relaciona los regímenes hidrológicos con las respuestas ecológicas a la alteración del río. Esto se realiza mediante correlaciones entre las medidas de condición ecológica y los caudales fluviales (Bradley *et al.*, 2012; DFO, 2013; Poff *et al.*, 2009; Poff y Zimmerman, 2010).

El método ELOHA sugiere el uso de los programas computacional HIP (Proceso de Evaluación de la Integridad Hidroecológica), desarrollado por el *U.S. Geological Survey*, o IHA (Indicadores de Alteración Hidrológica), desarrollado por The Nature Conservancy (2015). Mediante estos programas es posible analizar los datos hidrológicos, así como calcular el grado de alteración hidrológica.

El procedimiento científico del método se basa en los siguientes pasos:

1. Construcción de la base hidrológica mediante hidrogramas fluviales diarios o mensuales, en períodos largos de tiempo.
2. Clasificación y subclasificación de segmentos del río de acuerdo a similitudes de caudal y morfológicos.
3. Calculo de la alteración hidrológica de cada tramo de río, para lo cual se pueden emplear los programas de computación indicados antes.
4. Establecimiento de las relaciones entre la alteración de caudales y la respuesta ecológica. Para ello se pueden utilizar grupos bióticos sensibles a las alteraciones y utilizar herramientas estadísticas para establecer las relaciones (ver Figura 8).

ELOHA también sugiere posteriores mecanismos de gestión que pueden emplearse, para lo cual establece el siguiente proceso:

1. Determinación de las condiciones ecológicas aceptables para cada tramo o tipo de río, pero según los valores sociales interesados, mediante discusiones públicas, en donde se presentan los resultados obtenidos del fundamento científico.
2. Elaboración de los objetivos del Caudal Ecológico o Ambiental, según un grado permisible de alteración.
3. Gestión de caudales ambientales y su implementación, dentro de una planeación hídrica. Por eso, ELOHA no solo es un método para determinar Caudales Ecológicos pero también una herramienta de gestión.

#### **4.3.4 MÉTODOS CON ENFOQUE HOLÍSTICO O FUNCIONAL**

Estos métodos han sido principalmente desarrollados en Australia y Sudáfrica, e involucran la experticia de diferentes profesionales en varios aspectos multidisciplinarios. Estos buscan establecer los vínculos existentes entre varios aspectos de la hidrología, hidráulica y ecología del sistema fluvial, incluso aspectos sociales, abarcando una comprensión amplia e integral sobre el trabajo de expertos (Dyson *et al.*, 2003).

Algunos de los métodos funcionales buscan responder la pregunta “¿Cuánto se puede modificar el régimen de caudal de un río antes de que los ecosistemas acuáticos cambien notablemente o se degraden seriamente?” (Consuegra, 2013). La respuesta a esta pregunta dependerá del conocimiento del grupo de profesionales involucrados, por lo que se podría considerar un método

un tanto subjetivo. A continuación se presentan los métodos funcionales más conocidos y aplicados.

### **Método de evaluación por grupo de expertos (EPAM) -1995**

Este es un método desarrollado en Australia, enfocado principalmente a la conservación de las especies de peces. Se realizan reuniones grupales donde varios expertos discuten aspectos de ictiología, macroinvertebrados y geomorfología del ecosistema fluvial, hasta llegar a consensos de opiniones sobre los cambios en el caudal y sus efectos en la funcionalidad del ecosistema.

Este método utiliza poca información de campo y se basa en el juicio de los profesionales, por lo tanto puede llegar a ser un tanto subjetivo y basado en la confianza del conocimiento, y sin posibilidades de un seguimiento y validación posteriores (Arthington *et al.*, 2004; Consuegra, 2013; King *et al.*, 2008).

### **Método de evaluación por equipo científico (SPAM) -1996**

Es un método basado en el EPAM y al igual que el anterior se determina el Caudal Ecológico mediante trabajo de equipo multidisciplinario. Su diferencia radica en que incluye trabajos de campo con observaciones directas, recolección de información primaria e interpretación de datos.

Durante las reuniones de grupo, los especialistas deben llegar a consensos sobre: (i) la determinación de los criterios para la definición de Caudal Ecológico,

considerando las características de la flora arbórea de ribera, ictiofauna, invertebrados acuáticos, macrófitas y la geomorfología; (ii) la determinación de los criterios de estructura física del cauce, hidrografía y régimen de caudales, a diferentes escalas espaciales; (iii) la identificación de impactos y efectos para cada componente del ecosistema, para relacionar el régimen de caudales y la respuesta del ecosistema (Arthington *et al.*, 2004; Consuegra, 2013; King *et al.*, 2008).

### **Método de aproximación holística -1996**

Este método, también desarrollado en Australia, parte de la concepción de que los ríos contienen una cierta cantidad de agua que el sistema no requiere estrictamente para el adecuado mantenimiento de sus funciones; esta es la cantidad que se puede utilizar en actividades antrópicas. Por lo tanto, conociendo las características del régimen natural de caudales, es posible establecer los caudales modificados que permitan mantener la integridad ecosistémica y la biodiversidad.

Un grupo multidisciplinario de expertos es el encargado de realizar una evaluación de las diferentes alternativas de uso del recurso y los requerimientos de caudal, confrontándolos con la información disponible de la curva mensual detallada del régimen de caudales naturales. Cuando ya se han predefinidos los objetivos de caudal, se construye una curva del régimen de caudales modificado, la cual es equivalente al régimen de Caudal Ecológico (Arthington *et al.*, 2004;

Bragg *et al.*, 2005; Consuegra, 2013; ENDESA, 2009; King *et al.*, 2003; King *et al.*, 2008; Rebillard, 2006).

### **Método BBM (*Building Block Methodology*)**

Se trata de una modificación del método anterior, y fue desarrollado en Sudáfrica. Este considera que las fluctuaciones de caudal son cambios que provocan dinámicas perturbadoras en el ecosistema, pero a pesar de eso la biota acuática está adaptada a las mismas. Por lo tanto, para mantener la funcionalidad del ecosistema, se deben identificar los principales factores del régimen de caudales para que puedan ser incluidas en el régimen modificado, según los objetivos de manejo.

Al igual que los métodos anteriores se realizan reuniones grupales de expertos en temas sobre ecología acuática, ictiofauna, macroinvertebrados, vegetación ribereña, geomorfología e hidráulica. Allí se expone y organiza la información primaria y secundaria, e identifica la importancia ecológica, social y económica del río a nivel local, regional, nacional e internacional. Usualmente se desarrolla el trabajo multidisciplinario en dos fases:

1. Se seleccionan algunos transectos de la sección de estudio (de 1 – 5). Allí se caracteriza la flora acuática, la vegetación ribereña y el sustrato. Luego de eso se establece en cada transecto las relaciones existentes entre el caudal, la hidromorfología y los hábitats. Para esto, se requiere información de las curvas de duración de caudales y períodos de retorno. Finalmente,

se determina el estado deseado para mantener la integridad ecosistémica. Todo esto queda plasmado en un documento.

2. El grupo multidisciplinario realiza un trabajo de verificación de campo que complementa la fase anterior. Posteriormente, con la información recabada, primaria y secundaria, se desarrolla una propuesta de regulación mensual de caudales, en función de algunos criterios biológicos como es el ciclo de vida de las especies (desarrollo, reproducción, desove, migración).

La determinación del régimen de caudales ecológicos se rige a los objetivos de manejo del cauce hídrico; por ejemplo, la conservación de las especies de peces de importancia comercial o sustento alimenticio, mantenimiento de la navegabilidad del río, mantenimiento de áreas de importancia para la recreación o el turismo, conservación de especies ribereñas importantes o amenazadas, entre otros. Es decir, el Caudal Ecológico posiblemente sea diferente si se trata de conservar una especie íctica, o si se pretende mantener un sitio de importancia social (Arthington *et al.*, 2004; Castro *et al.*, 2006; Consuegra, 2013; Dyson *et al.*, 2003; King *et al.*, 2003; King *et al.*, 2008; Rebillard, 2006).

#### **4.3.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES ENFOQUES METODOLÓGICOS**

Las metodologías indicadas anteriormente presentan ventajas pero también ciertas desventajas de su utilización, importantes a conocer para su selección al momento de determinar el Caudal Ecológico de un determinado

ecosistema fluvial que está siendo o será intervenido (Arthington y Zalucky, 1998; Bradley *et al.*, 2012; Consuegra, 2013; Dyson *et al.*, 2003; King *et al.*, 2008). A continuación se indican estas ventajas y desventajas, según el enfoque dado, de manera general.

### **Enfoque Hidrológico**

**Ventajas.**- Los métodos con enfoque hidrológico tienen la ventaja de ser por lo general más económicos en su ejecución, la información hidrológica requerida por lo general está disponible y es accesible, los cálculos matemáticos son más fáciles y versátiles, y se requiere menos tiempo de estudio para su determinación. Por otro lado, la información obtenida es de utilidad para los demás enfoques metodológicos, y por lo tanto permiten una mejor selección de la metodología a emplearse.

**Desventajas.**- Los métodos hidrológicos pueden dar valores subestimados, ya que no consideran las características biológicas ni físicas del cauce, y pueden no estar acorde a los requerimientos de las especies que allí habitan. Por lo tanto se basan en asunciones que pueden ser irreales. Por otro lado, algunos métodos solo pueden ser aplicados a lugares específicos y no son aplicables a otras realidades.

### **Enfoque hidráulico**

**Ventajas.-** Los métodos hidráulicos requieren un tiempo de trabajo relativamente corto para su aplicación. La mayor ventaja es que visibilizan los vínculos existentes entre las características ecológicas del cauce hídrico y las condiciones físicas hidráulicas. Al realizarse en transectos estudiados, se ajustan mejor a la realidad.

**Desventajas.-** Estos métodos son más costosos que los hidrológicos por los requerimientos de información que deben ser recabados en campo. La modelación se realiza en función de un número limitado de transectos, por lo que se asumen las características ecológicas para toda la sección de análisis, que en la mayoría de casos no son comprobadas. Se basa en muchas presunciones.

### **Enfoque hidrobiológico (ecohidráulico / ecohidrológico)**

**Ventajas.-** Estos métodos tienen la ventaja de que visibilizan las interrelaciones entre las características ecológicas y las físicas del cauce, y evalúan las respuestas de las especies acuáticas, principalmente los peces, a las variaciones temporales y espaciales de caudal. Por otro lado, pueden ser utilizadas como herramienta para otros estudios hidrobiológicos y evaluaciones de impactos; así como para planes de manejo y conservación.

**Desventajas.-** Las desventajas de estos métodos es que la determinación del Caudal Ecológico está limitada a un grupo taxonómico o una comunidad

biótica, pero no a la integralidad de la cuenca. Se requieren estudios más extensos y multidisciplinarios, por lo que se incrementan los costos y tiempo de ejecución. Por otro lado, información sobre los requerimientos de hábitat o curvas de preferencias de las especies es muy escasa, y más aún sobre sus ciclos de vida.

### **Enfoque holístico o funcional**

**Ventajas.-** La ventaja de estos métodos es que incorporan otro tipo de información, como la socioeconómica, además de la biológica, hidrológica, hidromorfológica e hidráulica; interrelacionan todos estos aspectos por lo que los hace métodos más integrales. Incluso, permiten incluir la información que se requiere para los demás enfoques antes indicados.

**Desventajas.-** Las desventajas de estos métodos es que son más costosos y toman más tiempo de análisis, dado que se requiere la contratación de expertos en varias profesiones. En los grupos de trabajo, en ocasiones no se llegan a consensos y se dilatan en discusiones paradigmáticas.

### **4.3.6 SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDAL ECOLÓGICO**

Como puede verse, existen muchas metodologías y herramientas para establecer el Caudal Ecológico en un río bajo intervención y captación de agua. Por lo tanto, al momento de elegir una metodología, la tarea resulta complicada.

Según García de Jalón y González (1998), a la hora de seleccionar el método más adecuado para la determinación del Caudal Ecológico, se debe responder a tres preguntas importantes:

- i. ¿Cuál es el objetivo de la intervención o sustracción de agua?
- ii. ¿Cuál es el orden de prioridades de uso del agua?
- iii. ¿Cuál es el grupo taxonómico o comunidad biótica (faunística o florística) al que se pretende conservar?

Según las conclusiones del I Congreso sobre Caudales Ecológicos. Lo importante en la selección del método para establecer un Caudal Ecológico es que éste cumpla con su objetivo principal: *conservar el patrimonio biológico del medio fluvial, compatible con la satisfacción de las demandas sociales y sólo superado por el abastecimiento doméstico en el orden de prioridades* (APROMA, 2000, referenciado en: Agirre y Bikuña, 2000).

Además, debe ir acorde a los objetivos específicos que dependerán del tipo de intervención futura o presente, de las prioridades existentes en la zona, de la estructura del río, del tipo de biota existente, su biodiversidad, del área geográfica, entre otros. Obviamente, también dependerá del tiempo y recursos económicos disponibles.

Otro aspecto muy importante a la hora de establecer un Caudal Ecológico está relacionado con la legislación existente sobre este tema. Muchos países tienen

establecidos criterios, incluso procedimientos para su cálculo. Por esa razón, a continuación se tratará el tema sobre la legislación vigente en el Ecuador, en lo que se refiere a Caudales Ecológicos.

#### **4.4 LEGISLACIÓN ECUATORIANA SOBRE CAUDALES ECOLÓGICOS**

En la legislación ecuatoriana existen tres cuerpos legales que tratan el tema del Caudal Ecológico de forma manifiesta:

1. Constitución de la República del Ecuador (Registro Oficial 449 del 20 de Octubre del 2008).
2. Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (Registro Oficial 395 del 6 de agosto de 2014).
3. Texto Unificado de la Legislación Secundaria Ambiental (conocida como TULSMA), Libro VI – De la Calidad Ambiental, Anexo 1B - Norma para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental del Recurso Agua en Centrales Hidroeléctricas (Registro Oficial 155 del 14 de marzo de 2007).

A continuación se presentan los textos expuestos en estos tres cuerpos legales.

##### **4.4.1 CONSTITUCIÓN DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR**

La Constitución del Ecuador indica lo siguiente:

**Art. 318.-** “El Estado, a través de la autoridad única del agua, será el responsable directo de la planificación y gestión de los recursos hídricos que se destinarán a consumo humano, riego que garantice la soberanía alimentaria, caudal ecológico y actividades productivas, en este orden de prelación” (Título VI –Régimen de Desarrollo; Capítulo Quinto –Sectores Estratégicos, Servicios y Empresas Públicas).

**Art. 411.-** “El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua. La sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano serán prioritarios en el uso y aprovechamiento del agua” (Título VII –Régimen del Buen Vivir; Capítulo Segundo –Biodiversidad y Recursos Naturales; Sección Sexta –Agua).

#### **4.4.2 LEY ORGÁNICA DE RECURSOS HÍDRICOS, USOS Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA**

En la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del agua, se indica lo siguiente:

**Art. 64 –Conservación del Agua.-** “La naturaleza o Pacha Mama tiene derecho a la conservación de las aguas con sus propiedades como soporte

esencial para todas las formas de vida. En la conservación del agua, la naturaleza tiene derecho a:

- a) La protección de sus fuentes, zonas de captación, regulación, recarga, afloramiento y cauces naturales de agua, en particular, nevados, glaciares, páramos, humedales y manglares;
- b) El mantenimiento del caudal ecológico como garantía de preservación de los ecosistemas y la biodiversidad;.....” (Título III -Derechos, Garantías y Obligaciones; Capítulo III –Derechos de la Naturaleza).

**Art. 76 -Caudal Ecológico.-** “Para los efectos de esta Ley, caudal ecológico es la cantidad de agua, expresada en términos de magnitud, duración, época y frecuencia del caudal específico y la calidad de agua expresada en términos de rango, frecuencia y duración de la concentración de parámetros que se requieren para mantener un nivel adecuado de salud en el ecosistema.

La Autoridad Única del Agua en coordinación con la Autoridad Ambiental Nacional establecerá reglamentariamente los criterios, parámetros y metodologías para la determinación del caudal ecológico de acuerdo con las condiciones y las características de los cuerpos de agua, que serán considerados dentro de la planificación hídrica nacional.

Toda resolución de la Autoridad Única del Agua por la que se otorgue autorización para uso o aprovechamiento productivo del agua deberá establecer y considerar el caudal ecológico que fue determinado para ello, conforme con los criterios de la planificación hídrica nacional” (Título III -Derechos, Garantías y Obligaciones; Capítulo VI –Garantías Preventivas; Sección Primera -Caudal Ecológico y Áreas de Protección Hídrica).

**Art. 77 -Limitaciones y responsabilidades.-** El caudal ecológico de los cursos permanentes de agua en toda cuenca hidrográfica es intangible. Es responsabilidad de la Autoridad Única del Agua, de las instituciones y de todas las personas, sean usuarios o no del agua, el respetar la cantidad y calidad requerida que proteja la biodiversidad acuática y los ecosistemas aledaños.

Todas las actividades productivas respetarán el caudal ecológico.

El caudal ecológico definido no es susceptible de autorización para su uso o aprovechamiento productivo, a excepción de aquellos usos que no tenga como consecuencia la afectación en la calidad ni en cantidad del caudal ecológico...

Únicamente en el caso de declaración de estado de excepción, podrá autorizarse el uso del caudal ecológico para consumo humano, hasta tanto se adopten las medidas emergentes para garantizar nuevamente el abastecimiento” (Título III - Derechos, Garantías y Obligaciones; Capítulo VI –Garantías Preventivas; Sección Primera -Caudal Ecológico y Áreas de Protección Hídrica).

**Art. 86 -Agua y su prelación.-** De conformidad con la disposición constitucional, el orden de prelación entre los diferentes destinos o funciones del agua es:

- a) Consumo humano;
- b) Riego que garantice la soberanía alimentaria;
- c) Caudal ecológico; y,
- d) Actividades productivas”

(Título III -Derechos, Garantías y Obligaciones; Capítulo VI –Garantías Preventivas; Sección Segunda -De los Usos del Agua).

**Art. 110 -Autorización de aprovechamiento.-** Las actividades mineras deberán contar con la autorización de aprovechamiento productivo de las aguas que se utilicen, que será otorgada por la Autoridad Única del Agua, de conformidad con los procedimientos y requisitos establecidos en esta Ley y su Reglamento, para lo que se respetará estrictamente el orden de prelación que establece la Constitución, es decir, consumo humano, riego que garantice la soberanía alimentaria, caudal ecológico y actividades productivas. Al efecto, coordinará con la Autoridad Ambiental Nacional” (Título IV –Aprovechamiento del agua; Capítulo I –De los Tipos de Aprovechamiento Productivo; Sección Cuarta - Aprovechamiento del Agua en Minería).

#### **4.4.3 TULSMA, LIBRO VI, ANEXO 1B**

Este Anexo Normativo que está al amparo de la Ley de Gestión Ambiental, es un complementario del Anexo 1 –Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua.

Dentro del Numeral 2 –Definiciones, se indica lo siguiente:

**Numeral 2.2 –Caudal Ecológico.-** “Es el caudal de agua que debe mantenerse en un sector hidrográfico del río, para la conservación y mantenimiento de los ecosistemas, la biodiversidad y calidad del medio fluvial y para asegurar los usos consuntivos y no consuntivos del recurso, aguas abajo en el área de influencia de la central hidroeléctrica y su embalse, donde sea

aplicable. El caudal ecológico debe ser representativo del régimen natural del río y mantener las características paisajísticas del medio” (dentro del Numeral).

**Numeral 2.7 –Régimen de Caudales Ecológicos.**- “Conjunto de caudales ecológicos que asemejan las condiciones hidrológicas o caudales circulantes por determinado sector hidrográfico del río” (dentro del Numeral 2 –Definiciones).

Los siguientes numerales se localizan dentro del Numeral 4 –Desarrollo; 4.4 –Normas para la Determinación del Caudal Ecológico y el Régimen de Caudales Ecológicos en los Sectores Hidrográficos Respectivos; 4.4.1 –De la Adopción de un Caudal Ecológico y las Responsabilidades por la Ejecución de Estudios para el Cálculo y Determinación del Caudal Ecológico; se indica lo siguiente:

**Numeral 4.4.1.2.**- “La entidad administradora de los recursos hídricos deberá garantizar que los proyectos hidroeléctricos que involucren represamiento, cambio o alteración del régimen de caudales en sectores hidrográficos de los ríos, ejecuten los estudios para el cálculo y determinación de un caudal ecológico y del régimen de caudales ecológicos. Los valores de caudales ecológicos y regímenes de caudales ecológicos serán aprobados por el CONELEC (actual ARCONEL). La entidad administradora de los recursos hídricos harán respetar el caudal ecológico y régimen de caudales ecológicos aprobados”.

**Numeral 4.4.1.4.**- “Los promotores de los proyectos hidroeléctricos son los responsables por la ejecución oportuna de los estudios para el cálculo y

determinación del caudal ecológico y del régimen de caudales ecológicos. La determinación del caudal ecológico y los regímenes de caudales ecológicos deberá ser ejecutado como parte de los estudios de prefactibilidad de un proyecto hidroeléctrico. El estudio de impacto ambiental del proyecto hidroeléctrico deberá evaluar el caudal ecológico y los regímenes de caudales ecológicos propuesto por el promotor del proyecto”.

**Numeral 4.4.1.5.-** “Los regulados en el caso de centrales hidroeléctricas existentes antes de marzo de 2003, adoptarán como caudal ecológico al menos el 10% del caudal medio anual que circulaba por el río aguas abajo de las inmediaciones del cuerpo de la presa antes de su construcción. Cualquier caudal por debajo de este valor deberá ser sustentado técnicamente con la aplicación de la metodología para el cálculo del caudal ecológico, descrita en el presente anexo normativo. Los efectos del caudal adoptado, 10% del caudal medio anual, deberán ser evaluados mediante monitoreos para asegurar que no existan efectos sobre los ecosistemas del cuerpo de agua y sobre los usos consuntivos y no consuntivos aguas debajo de la central hidroeléctrica tanto en época lluviosa como durante la estación seca. De existir efectos negativos significativos con el caudal adoptado, el mismo deberá ser revisado acorde a lo establecido en el 4.4.1.6”.

**Numeral 4.4.1.6.-** “La Autoridad Ambiental de Aplicación Responsable (AAAr) del Sector Eléctrico, el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC, actual ARCONEL) y los administradores del recurso hídrico podrán solicitar la adopción de caudales diferentes al 10% del caudal medio anual que circula por el

río de considerarlo necesario para salvaguardar la integridad del recurso y garantizar los usos consuntivos y no consuntivos aguas abajo del proyecto hidroeléctrico”.

**Numeral 4.4.1.7.-** “La información a recopilarse para la adopción de un caudal ecológico (al menos 10% del caudal medio anual) y el cálculo del caudal ecológico y del régimen de caudales ecológicos deberá comprender todos los registros disponibles de los caudales históricos del cuerpo de agua y cuenca hidrográfica en estudio. La información provendrá de las respectivas agencias especializadas públicas o privadas del país y de las estaciones meteorológicas más cercanas. Adicionalmente, la información para la determinación de los caudales ecológicos deberá como mínimo comprender un año de monitoreo del cuerpo de agua. En caso de ocurrencia de sequías o avenidas, el período de monitoreo ambiental se extenderá por un tiempo adicional que deberá ser técnicamente sustentado”.

Los siguientes numerales se ubican dentro del Numeral 4 –Desarrollo; 4.4 –Normas para la Determinación del Caudal Ecológico y el Régimen de Caudales Ecológicos en los Sectores Hidrográficos Respectivos; 4.4.2 –De los Métodos a Utilizarse para el Cálculo y Determinación del Caudal Ecológico; se indica lo siguiente:

**Numeral 4.4.2.1.-** “El cálculo de caudal ecológico se podrá realizar utilizando diferentes modelos, métodos, herramientas o programas existentes

para el efecto y que hayan sido utilizados o probados para propósitos similares en proyectos hidroeléctricos”.

**Numeral 4.4.2.2.-** “Los modelos y programas a ser utilizados para el cálculo de caudal ecológico tendrán como requerimiento mínimo el considerar variables de importancia para la integridad biológica de los ecosistemas del río. El modelo o método seleccionado por el promotor de una obra o central deberá ser sustentado ante la AAAr y la Entidad Ambiental de Control en concordancia con los aspectos del numeral 4.4.3.2 del presente anexo normativo técnico. Las variables de importancia o variables de control, asegurarán el mantenimiento y control de las condiciones (línea base) encontradas en el sitio previo construcción del proyecto”.

**Numeral 4.4.2.3.-** “Para el cálculo del caudal ecológico no es suficiente la utilización de métodos de cálculo basados en datos históricos de caudales medios mensuales o la adopción de un porcentaje del promedio de los caudales mínimos mensuales en épocas de estiaje. Estos métodos de cálculo son insuficientes salvo que se complementen con datos históricos sobre las condiciones bióticas y físico-químicas del sector hidrográfico para demostrar que los caudales a ser adoptados son caudales ecológicos. Para el efecto se tomará en cuenta las consideraciones indicadas en el numeral 4.4.3 de este anexo normativo”.

Los siguientes numerales se ubican dentro del Numeral 4 –Desarrollo; 4.4 –Normas para la Determinación del Caudal Ecológico y el Régimen de Caudales Ecológicos en los Sectores Hidrográficos Respectivos; 4.4.3 –De los

Requerimientos para el Cálculo del Caudal Ecológico y del Régimen de Caudales Ecológicos; se indica lo siguiente:

**Numeral 4.4.3.1.-** “El caudal ecológico deberá ser representativo del régimen natural del río, ser compatible con los requerimientos físicos de la corriente fluvial para mantener su estabilidad y cumplir todas sus demandas, además de mantener la calidad del recurso y las características paisajísticas del medio. El caudal ecológico deberá ser determinado y mantenido en los tramos fluviales aguas abajo de la ubicación de la central, donde se espera la ocurrencia de alteraciones en el régimen hídrico por la operación de la central. Los sectores hidrográficos donde se mantendrán los caudales ecológicos deberán ser definidos de acuerdo al tipo de central, de acuerdo con las características morfológicas e hidrográficas del río, debiendo su extensión ser sustentada técnicamente”.

**Numeral 4.4.3.2.-** “Para el cálculo del caudal ecológico se deberá determinar al menos los siguientes parámetros y aspectos:

- a) Régimen del río: caudal, velocidad, variaciones estacionales y anuales, sequías, inundaciones;
- b) Calidad del agua: características físico-químicas, características biológicas y microbiológicas del agua: plancton, clorofila A, organismos bentónicos, ictiofauna, hábitat acuático, coliformes fecales;
- c) Interacciones bióticas en el agua y tierra-agua: especies endémicas, especies exóticas, estructura poblacional biótica, estructura trófica; y,
- d) Usos del agua en el área de influencia del proyecto: agricultura, extracción, consumo humano, recreativas, transporte fluvial, entre otros usos.”

**Numeral 4.4.3.4.-** “El cálculo del régimen de caudales ecológicos tomará en consideración principalmente:

- a) El régimen natural estacional del río, en el que el caudal fluctúa de una manera natural;
- b) Oscilación estacional natural y fluctuación anual de acuerdo al clima (años húmedos, años secos, años extremadamente secos, hidrógrafas, El Niño Oscilación Sur). Estas variaciones podrían ser fundamentales para las especies autóctonas o nativas, lo cual las haría más o menos competitivas frente a especies introducidas; y,
- c) El régimen de caudales ecológicos, que debe fluctuar a lo largo del año siguiendo el régimen natural del río”.

**Numeral 4.4.3.5.-** “El régimen de caudales ecológicos deberá considerar la existencia de avenidas con frecuencias entre uno y dos años con el objeto de mantener en buenas condiciones el sustrato del río y la vegetación ribereña, adaptando el régimen a las necesidades de especies presentes en el ecosistema”.

**Numeral 4.4.3.6.-** “El caudal ecológico y el régimen de caudales ecológicos aprobado por la autoridad ambiental y adoptado para la operación de la central hidroeléctrica deberá ser evaluado a lo largo de la vida útil de la central hidroeléctrica para asegurar el mantenimiento de las condiciones de calidad del agua, de los ecosistemas y para asegurar los usos consuntivos y no consuntivos aguas abajo, en el área de influencia de la central. La evaluación del caudal

ecológico y los regímenes se realizará en virtud de los datos obtenidos producto del monitoreo físico-químico y biológico de los respectivos cuerpos de agua y sectores hidrográficos”.

#### **4.5 CASOS DE ESTUDIO DE CAUDAL ECOLÓGICO EN RÍOS ALTOANDINOS**

Previo al análisis de los casos de estudio en ríos altoandinos, es importante conocer las características e importancia de los ríos ubicados en esta región geográfica. Por lo tanto, a continuación se presenta una introducción de este tipo de ecosistemas.

##### **4.5.1 LOS RÍOS ALTOANDINOS, CARACTERÍSTICAS E IMPORTANCIA**

###### **Características físicas y morfológicas**

En la zona Altoandina se originan grandes cuencas hidrográficas sudamericanas como la del Amazonas, que desemboca en el océano Atlántico. Los sistemas acuáticos Andinos son de varios tipos: turberas, bofedales, lagunas, lagos, vertientes (incluso termales), riachuelos y ríos.

En cuanto a su morfología, pueden ser muy variados, algunos fluyen en una corriente escarpada, otros son sistemas trezados en planicies aluviales, que

consiste en una red de canales pequeños separados frecuentemente por pequeñas islas temporales (Jacobsen *et al.*, 1997).

### **Características bioacuáticas**

La biodiversidad acuática en los Andes ecuatorianos ha sido menos estudiada que la terrestre. Lo cual ha impedido obtener una clara interpretación de los patrones regionales de diversidad. Sin embargo, a continuación se indica lo que los conocimientos actuales permiten deducir, de acuerdo a los grandes grupos taxonómicos acuáticos.

#### Fitoplancton:

En lo que se refiere a las algas, existen más estudios realizados en ecosistemas lénticos que en los lóticos, y por lo tanto son pocas las especies de río que han sido registradas. Tampoco existe información sobre los niveles de endemismo en los sistemas acuáticos andinos. En Ecuador la mayor cantidad de estudios de este grupo taxonómico se han centrado en lagos y lagunas. Allí por ejemplo, los estudios de Steinitz-Kannan (1997) indican la existencia de unas 1500 especies de diatomeas. Sin embargo, los pocos estudios realizados en ríos altoandinos sugieren que la diversidad de diatomeas podría ser incluso mayor que en lagos (De Oliveira y Steinitz-Kannan, 1993; Steinitz-Kannan, 2000).

Algunos estudios indican que la diversidad de fitoplancton está relacionada con el contenido de minerales disueltos en el agua, siendo ésta mayor en aguas

poco mineralizadas. Se reportan incluso ciertos patrones en la estructura de las comunidades del fitoplancton, como resultado de diferencias en las características geológicas (Maldonado *et al.*, 2011; Ríos-Pulgarín *et al.*, 2016). Otros estudios sugieren modificaciones en la composición de diatomeas producidos por cambios en el pH y en la turbiedad del agua (Díaz-Quiróz y Rivera-Rondón, 2004). También se reporta que más especies de algas ocurren en aguas generalmente oligotróficas, es decir que contienen bajos niveles de materia orgánica.

#### Macrofitas (plantas acuáticas):

En los sistemas acuáticos andinos, existen plantas acuáticas flotantes, especialmente en cuerpos de agua de corriente lenta o estacionaria, de los géneros *Ranunculus*, *Lilaea*, *Callitriche* e *Isoetes*. Este último presenta una más alta riqueza de especies y endemismo; además se lo considera un indicador de aguas oligotróficas (Maldonado *et al.*, 2011). En lo que se refiere a la vegetación sumergida, en los ríos de los Andes ecuatorianos existen únicamente dos especies *Myriophyllum quítense* y *Potamogeton paramoanus*, cuyos géneros son cosmopolitas (Terneus y Vásconez, 2003).

Al igual que el fitoplancton, la diversidad de la vegetación acuática están relacionados con la concentración de minerales en el agua; es decir, mientras más dura el agua, menor es la diversidad (Terneus y Vásconez, 2003).

### Zooplancton:

Respecto de este grupo taxonómico, el nivel de conocimiento para los cuerpos de agua altoandinos es pobre. De lo que se sabe, muchos géneros de zooplancton son de distribución cosmopolita y el género dominante y característico es *Boeckella* (Copepoda), en todos los tipos de sistemas acuáticos. Al igual que en los grupos anteriores, la diversidad y composición de las comunidades está influenciada por el grado de mineralización del agua, y la biodiversidad aumenta a medida que disminuye la dureza del agua (Maldonado *et al.*, 2011).

### Macroinvertebrados bénticos:

Este es un grupo relativamente bien estudiado en los ríos altoandinos. Al nivel de familias el grado de conocimiento es significativo, aunque se conoce menos sobre la taxonomía a nivel de especies. Esto se debe a que la identificación requiere mucha experticia por ser un grupo conformado principalmente por insectos acuáticos en estadio de larva (Jacobsen *et al.*, 1997).

Según Jacobsen y colaboradores (1997), en los ríos de la zona altoandina ecuatoriana los grupos taxonómicos más dominantes son Hyalellidae (Amphipoda), Elmidae (Coleoptera), Chironomidae y Simuliidae (Diptera), Baetidae (Ephemeroptera), Hydroptilidae y Limnephilidae (Trichoptera), Planariidae (Turbellaria) y Oligochaeta.

En términos generales, el patrón de distribución de los macroinvertebrados en relación a la altitud no es muy clara, aunque algunos estudios parecen indicar que la diversidad disminuye a mayor altitud para esos grupos indicados antes. Se ha notado que también la diversidad y composición de los macroinvertebrados bénticos está relacionado con la mineralización del agua (Girard, 2008; Jacobsen *et al.*, 1997).

#### Ictiofauna:

Las incertidumbres taxonómicas y los vacíos geográficos de conocimiento, ha dificultado para el cálculo del número total de especies de peces que habitan los altos Andes. Sin embargo, Maldonado y colaboradores (2011) indican que existen registros que dan cuenta de que en la zona Andina el número de peces es aproximadamente de 220 en Colombia, 162 en Bolivia, 125 en Perú y 92 en Ecuador.

En Ecuador las familias de peces representativas de la zona Andina son Astroblepidae, Characidae y Trichomycteridae. El género de las preñadillas (*Astroblepus*) es el más abundante, seguido de *Grundulus* y *Chaetostoma* (Nugra, 2014; Román-Valencia *et al.*, 2005). También el género *Trichomycterus* se destaca por su diversificación en los Andes y porque es el único género que se distribuye a lo largo de todo gradiente altitudinal. Cabe resaltar que en muchos ríos altoandinos albergan poblaciones de truchas (*Onchorhynchus mykiss*), especie introducida que actualmente se ha naturalizado en muchos cuerpos de agua andinos (Maldonado *et al.*, 2011).

En los ríos que conforman el Alto Amazonas (cuencas del Napo, Morona y Pastaza) existe mayor diversidad que aquellos que drenan hacia el Pacífico (cuencas del Esmeraldas y Guayas); aunque estos últimos tienen mayor endemismo. Vale indicar que tienen El 45% de las especies registradas en el Ecuador son endémicas (Maldonado *et al.*, 2011).

En relación a la altitud, la riqueza de especies es mayor sobre los 1100 msnm y decrece a mayor altura. Además, entre los 2200 y 3300 msnm, solo se han registrado preñadillas (*Astroblepus* spp.); a alturas mayores únicamente se conoce una especie del género *Grundulus* (Román-Valencia *et al.*, 2005).

### **Ríos Andinos y las poblaciones humanas**

Las poblaciones humanas en los Andes ecuatorianos se han desarrollado dependientes de los ríos para satisfacer sus necesidades de agua y energía (Buytaert *et al.*, 2006). La creación de reservorios, embalses y captaciones de agua ya han alterado sustancialmente el caudal de varios ríos andinos. Se espera en las siguientes décadas un incremento de la extensión y magnitud de las transformaciones de los caudales de los ríos Andinos, por una mayor demanda por agua y energía, y por el cambio climático.

En relación al agua de uso doméstico, grandes ciudades dependen de los cauces altoandinos como su principal fuente de agua (Mulligan *et al.*, 2010). Por

ejemplo en Quito, aproximadamente el 85% del agua potable proviene de ríos que fluyen de los páramos (Buytaert *et al.*, 2006).

El agua para riego es uno de los más significativos usos consuntivos en el Ecuador, con más del 80% del agua superficial captada. Varios ríos altoandinos son captados para múltiples proyectos de riego a todo lo largo de su curso. Esto ha producido una reducción de los caudales o su pérdida total (Buytaert *et al.*, 2006; Crespo *et al.*, 2009).

Igualmente el clima y la topografía andina permiten el desarrollo de proyectos hidroeléctricos; esto por el flujo relativamente constante de agua y la velocidad de la corriente que posibilita la generación de electricidad. En el Ecuador, aproximadamente el 45% de electricidad proviene de hidroeléctricas como Paute, Pucará, Agoyán, San Francisco, entre otras (Mulligan *et al.*, 2010). Muchas más centrales hidroeléctricas se encuentran ya en construcción o en propuesta para la región andina, lo que resulta en una fragmentación y alteraciones del caudal de los ríos. Entre 2006 al 2015, se esperaba que las demandas por electricidad crezcan en una tasa anual del 4 al 6%, por lo que los nuevos proyectos hidroeléctricos darían solución a esas demandas (Mulligan *et al.*, 2010).

### **Los ríos altoandinos y el cambio climático**

Los modelos y escenarios de cambio climático analizados, muestran que existe la posibilidad de que se alteren sustancialmente los regímenes de caudales

naturales históricos en ríos altoandinos. Algunas proyecciones actuales muestran que en la región Andina se presentaría un incremento de temperatura de 4,5 a 5,0°C en el siglo 21 (Mulligan *et al.*, 2010).

Este calentamiento podría causar el deshielo de los glaciares y provocar un incremento inicial de la escorrentía superficial, seguida de modificaciones extremas en los regímenes de caudal de los ríos de ese origen. El caso de los deshielos de los Andes es preocupante pues existe una fuerte dependencia de poblaciones y ciudades con estas fuentes para abastecer las demandas de agua y de energía (Mulligan *et al.*, 2010).

#### **4.5.2 ANÁLISIS DE TRES CASOS DE ESTUDIO DE CAUDAL ECOLÓGICO EN RÍOS ALTOANDINOS**

Esta monografía hace un análisis de las metodologías que fueron utilizadas para la determinación del Caudal Ecológico en tres casos de estudio ubicados en sistemas fluviales altoandinos ecuatorianos:

1. Caso 1: Cuenca alta del río Pastaza (Moreno, 2008)
2. Caso 2: Microcuencas Guayllabamba y Papallacta (Rosero, 2011)
3. Caso 3: Microcuenca del río Machángara (Alomía y Chimbo, 2014)

Estos casos de estudio se presentan a continuación.

### **Caso 1: Cuenca alta del río Pastaza (Moreno, 2008)**

Este estudio fue realizado por Moreno (2008) en la Escuela Politécnica Nacional y se trata de una tesis de grado para la obtención del título de Ingeniera Ambiental, con el título: Metodología y Determinación de Caudales Ambientales en la Cuenca del Río Pastaza.

#### Sistema(s) hídrico(s) estudiado(s)

El estudio se centró en tres tramos ubicados en la cuenca alta:

1. Tramo 1: Río Cutuchi AJ<sup>1</sup> Río Yanayacu.
2. Tramo 2: Río Cebadas AJ Río Guamote.
3. Tramo 3: Río Pastaza aguas abajo de la presa de la hidroeléctrica Agoyán.

Estos tramos fueron seleccionados debido a dos criterios importantes: (i) nivel de presión hídrica por aprovechamiento y (ii) cantidad y veracidad de la información hidrológica existente.

#### Características biofísicas del(os) sistema(s) hídrico(s) estudiado(s):

##### *Tramo 1: Río Cutuchi AJ Río Yanayacu*

El río Cutuchi forma parte de la subcuenca del río Patate ubicada hacia las estribaciones de la cordillera central, a una altitud superior de 3200 msnm. La

presión hídrica que recibe este río debe principalmente a una gran cantidad de pequeñas y medianas concesiones para riego y una pocas más para uso industrial.

La subcuenca Patate presenta un clima frío semihúmedo, con temperatura media 9°C, precipitación media anual de 800 – 1600 mm, 84% de humedad relativa media y una evaporación media anual 120 mm.

### *Tramo 2: Río Cebadas AJ Río Guamote*

El río Cebadas forma parte de la subcuenca del río Chambo, ubicado en las estribaciones de la cordillera occidental de los Andes, a una altitud promedio de 3600 msnm. La presión hídrica que recibe este río se debe al aprovechamiento para la generación de la Empresa Eléctrica de Riobamba y también concesiones para riego existentes.

Su clima se caracteriza por ser frío semihúmedo, con una temperatura media de 6°C, precipitación media anual de 800 – 1000 mm, humedad relativa media de 82% y evaporación media anual de 100 mm.

### *Tramo 3: Río Pastaza aguas abajo de la presa de la hidroeléctrica Agoyán*

El Tramo 3 ubicado en el río Pastaza, aguas abajo de la Presa Agoyán, es el más importante por la gran transformación hidromorfológica e hidrológica

---

<sup>1</sup> AJ = Antes de la junta o la unión con el río tributario

causada por el proyecto hidroeléctrico en el río Pastaza. El agua captada retorna al río a 15 Km aguas abajo, antes de la Quebrada San Francisco.

Este tramo crítico es prácticamente seco en épocas de estiaje y se muestra un determinado caudal de agua únicamente desde abril hasta agosto. En este tramo, el río se recupera en una pequeña cantidad, gracias a los ingresos de tributarios permanentes como los ríos Blanco (1,98 m<sup>3</sup>/s) y Verde (10,30 m<sup>3</sup>/s), en su margen izquierda; Chinchín Grande (7,41 m<sup>3</sup>/s) y Cristal (4,00 m<sup>3</sup>/s), en su margen derecha. Existen otras quebradas menores pero son intermitentes, por lo que su aporte es irregular y dependiente de las estaciones (La Merced, Machay, Arroyo, Chinchín Chico, San Pedro).

El río Pastaza pertenece a la gran cuenca Marañón-Amazonas. La cuenca alta del río está poblada de trucha (*Oncorhynchus mykiss*), especie introducida que ha desplazado a las preñadillas nativas (*Astroblepus* spp.), cuya población ha disminuido y ahora son difíciles de encontrar.

#### Enfoque y objetivo:

La metodología está basada en un enfoque básicamente hidrológico. Se asume que el Régimen de Caudales es el aspecto determinante para la existencia de la diversidad acuática y la conformación de las comunidades bióticas, ya que éstas han evolucionado frente a una adaptación de sus ciclos biológicos a estas oscilaciones. Por lo tanto, el estudio no utiliza las preferencias de hábitat de

algún(os) taxón(es), especie(s) o comunidad biótica, como objetivo para la determinación del caudal ecológico.

#### Metodología aplicada:

El método utilizado se basa en la combinación de los criterios establecidos por la metodología de Régimen de Caudales de Mantenimiento de Palau (1994; citado en Moreno, 2008) y del Régimen Ambiental de Caudales (RAC) propuesto por Martínez y Fernández (2006; citado en Moreno, 2008). En la Figura 9 se presenta un esquema del planteamiento metodológico propuesto en este estudio. Para esto realiza una completa caracterización hidrológica que considera una serie amplia de parámetros calculables a través de los registros históricos de caudales, como son:

1. Caudal Base ( $Q_b$ ): es “el caudal mínimo necesario para el mantenimiento de las características esenciales y la estructura de la comunidad natural acuática”. De acuerdo a la metodología de Palau (1994) el  $Q_b$  finalmente resulta en un valor entre el caudal mínimo absoluto y el caudal medio. Si la curva de caudales mínimos es corta, significa una situación extraordinaria para las comunidades acuáticas. En cambio, si la curva de caudales mínimos es amplia, entonces se considera una situación ordinaria para las especies. En ese caso, el  $Q_b$  tendrá un valor más cercano al caudal mínimo, y será diferente para cada ecosistema, dependiendo de las variabilidades hidrológicas interanuales e intra-anales.

2. Caudal de acondicionamiento: este se calcula en casos en que el  $Q_b$  resulta escaso en función de los requerimientos de las comunidades bióticas que allí habitan. Es decir que este caudal compensa el valor del  $Q_b$ , a través de la simulación hidráulica de secciones transversales estudiadas en el tramo del sistema fluvial analizado.
3. Caudal estándar: es la suma del  $Q_b$  y del caudal de acondicionamiento.
4. Factor de variabilidad temporal o estacional: este factor es aplicado al caudal estándar, manteniendo las tendencias del régimen natural de caudales.
5. Régimen de caudales ambientales: se basa en la tendencia del régimen hídrico, basado en los valores mensuales de los caudales diarios, en función del factor de variabilidad temporal sobre el caudal estándar.
6. Régimen de caudales ambientales mínimos: corresponde a los valores mínimos del régimen de caudales ambientales, obtenidos del análisis estadístico de medias móviles del  $Q_b$  (analiza un grupo de datos a manera de puntos para obtener datos promedio). Sobre estos caudales también se aplica el factor de variabilidad estacional.
7. Caudal mínimo: es el mínimo registrado en el histórico de caudales y se aplica únicamente en situaciones excepcionales de variabilidad de caudales, por eventos anormales (ej. sequías extremas, Fenómeno de El Niño).

8. Caudal generador: es el valor de caudal más probable de las crecidas anuales. Se aplica cuando se considera necesaria una regeneración del sedimento del sustrato y de las riberas.
9. Caudal para mantener la calidad del agua: es el caudal considerado apropiado para mantener las características fisicoquímicas y bacteriológicas en concentraciones adecuadas para la supervivencia de las especies acuáticas y otros usos del agua. Este parámetro se evalúa en función de índices fisicoquímicos o biológicos.

Además de todo este análisis hidrológico, el estudio realiza una comparación entre los resultados obtenidos y el cálculo del 10% del caudal medio multianual, considerando lo que estaba establecido por el ex CNRH para la determinación del Caudal Ecológico.

#### Resultados obtenidos:

##### *Tramo 1: Río Cutuchi AJ Río Yanayacu*

Utilizando la metodología establecida por el ex CNRH del 10% de la media multianual, se obtiene un Caudal Ecológico fijo de 0,91 m<sup>3</sup>/s para este tramo ubicado en el río Cutuchi. En cambio, utilizando la metodología de RAC propuesta por la autora, cuyos resultados se presentan en la Figura 10, los caudales ambientales calculados van de 3,23 m<sup>3</sup>/s (agosto) a 5,07 m<sup>3</sup>/s (abril); el caudal mínimo calculado es de 1,70 m<sup>3</sup>/s.

### *Tramo 2: Río Cebadas AJ Río Guamote*

Calculando el 10% de la media multianual, se obtiene un Caudal Ecológico fijo de 2,10 m<sup>3</sup>/s para este tramo ubicado en el río Cebadas. En cambio, utilizando la metodología de RAC, cuyos resultados se presentan en la Figura 11, los caudales ambientales calculados van de 3,77 m<sup>3</sup>/s (enero) a 9,45 m<sup>3</sup>/s (julio); el caudal mínimo calculado es de 0,80 m<sup>3</sup>/s.

### *Tramo 3: Río Pastaza aguas abajo de la presa de la hidroeléctrica Agoyán*

Calculando el 10% de la media multianual, se obtiene un Caudal Ecológico fijo de 12,1 m<sup>3</sup>/s para este tramo ubicado aguas debajo de la presa Agoyán. En cambio, utilizando la metodología de RAC, cuyos resultados se presentan en la Figura 12, los caudales ambientales calculados van de 50,5 m<sup>3</sup>/s (enero) a 80,3 m<sup>3</sup>/s (junio); el caudal mínimo calculado es de 17,0 m<sup>3</sup>/s.

### Análisis del Caso de Estudio 1

La metodología de RAC utilizada en la investigación es indudablemente bastante completa en relación a otras con enfoque hidrológico. Los parámetros calculados son innovadores respecto a otros estudios de Caudal Ecológico revisados. Incorpora además el criterio de calidad del agua que en muchos casos se obvia. Por otro lado, es un método accesible a diversas condiciones de estudio, pues utiliza datos disponibles; por lo tanto es eficiente desde el punto de

vista de recursos económicos. Los parámetros hidrológicos calculados permiten visualizar de manera amplia las múltiples variaciones de caudal a las cuales las especies de ese ecosistema se han adaptado.

El título del proyecto indica la determinación de *Caudales Ambientales*. Sin embargo, considerando los conceptos expuestos en la presente monografía, el estudio requiere aún incorporar datos de preferencias de hábitat de las especies presentes o comunidad biótica, de manera que los valores obtenidos puedan ser verificados. Igualmente, resta incluir información socioeconómica respecto de los otros usos que las comunidades están dando a los ríos analizados.

### **Caso 2: Microcuencas Guayllabamba y Papallacta (Rosero, 2011)**

Este estudio de Rosero (2011) fue realizado como parte del *Sistema de Monitoreo para Evaluar la Disponibilidad de Agua y Evolución de los Impactos Asociados al Cambio Climático en la Parte Alta de la Cuenca del río Guayllabamba y en las Microcuencas Papallacta y Antisana*, ejecutado por el Fondo Ambiental del Agua (FONAG), con el aporte y apoyo de la Secretaría General de la Comunidad Andina, el Banco Mundial, el Fondo Mundial Ambiental y el Ministerio del Ambiente – Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (MAE/PRAA).

### Sistema(s) hídrico(s) estudiado(s):

El sistema hídrico estudiado es el río Papallacta, perteneciente a la microcuenca que lleva su mismo nombre. Este cauce fue seleccionado porque es captado doblemente:

1. Para abastecer a una central hidroeléctrica de la Empresa Eléctrica Quito, en el Parque Nacional Cayambe Coca, por la empresa HCJB.
2. Para el sistema de agua potable del Distrito Metropolitano de Quito, en el sitio donde el caudal turbinado de la hidroeléctrica indicada antes es devuelto al río.

Los ríos Tambo y Nieves Toma también fueron estudiados pero como sitios de control, pues no han sido intervenidos; están ubicados en la Reserva Ecológica Antisana y en la zona de influencia de la Reserva Ecológica Los Illinizas, respectivamente.

### Características biofísicas del(os) sistema(s) hídrico(s) estudiado(s):

La microcuenca Papallacta nace en un ecosistema de páramo y recorre hacia la Vertiente Atlántica, ubicándose en la Cordillera Oriental de los Andes. Su clima está influenciado por la humedad y corrientes de viento de la Amazonía.

### Enfoque y objetivo:

La determinación del Caudal Ecológico se basó en el análisis de viabilidad de los hábitats de macroinvertebrados bénticos, especialmente del efemeróptero *Andesiops* sp. (Familia Baetidae), representante de zonas de páramo y bosque nublado. Se seleccionó este invertebrado por ser relativamente fácil su muestreo e identificación taxonómica, y por ser indicador de alteraciones ambientales en los ríos.

La autora asume que los requerimientos de hábitat de este género pueden ser extrapolados a otros taxones bénticos de similares características y hábitos ecológicos; por ejemplo otros efemerópteros, especialmente de la familia Baetidae y/o larvas acuáticas ramoneadoras.

### Metodología aplicada:

En este estudio, la metodología aplicada utiliza un enfoque hidrobiológico (ecohidrológico – ecohidráulico). Se fundamenta en que:

- a) Las especies acuáticas existentes en un río responden a su habilidad de existir en las condiciones definidas por las variables físicas hidráulicas del río (profundidad, velocidad de la corriente, tipo de sustrato, pendiente, etc.).

- b) Las especies acuáticas existentes en un río han adaptado sus ciclos de vida al régimen hidrológico natural, con sus oscilaciones e incluso eventos extremos ocasionales.

Por lo tanto, Las variables hidráulicas, hidrológicas y biológicas son el insumo para la determinación del Caudal Ecológico; y una manera de integrarlos es mediante el modelo conocido como Hábitats Viabes en función del Régimen de Caudales. La autora utiliza esta herramienta para definir los caudales ecológicos.

Para este modelo se obtuvo la siguiente información de base requerida y que permitió el desarrollo del modelo:

1. Índice LIFE (“Lotic Index of Invertebrates for Flow Evaluation”): Se basa en la densidad de macroinvertebrados bénticos en función de la velocidad de la corriente. Por lo tanto, se realizó un monitoreo sistemático, durante 4 años, de macroinvertebrados bénticos en diferentes tramos del río, relacionándolos a los datos de velocidad de la corriente. Posteriormente, para este índice se generaron diferentes rangos de velocidades, los cuales se caracterizan y ponderan al igual que la abundancia de cada grupo taxonómico. Finalmente, se calcula un puntaje agregado que se relaciona al caudal por medio de métricas estadísticas para obtener el índice. La herramienta puede utilizar datos de especies, géneros o familias del taxón objetivo. Este índice LIFE luego se combina con los datos históricos de

caudal: percentiles de probabilidad 25 y 50%, caudales medios, máximos y mínimos.

2. Preferencias hidráulicas del taxón objetivo: Se realizaron muestreos sistemáticos de macroinvertebrados bénticos, complementado con la toma de datos de velocidad de la corriente, profundidad y tipo de sustrato. Los resultados permitieron realizar unas curvas de las preferencias hidráulicas del taxón objetivo de acuerdo a la distribución estadística de los datos, lo cual se denomina idoneidad o viabilidad del hábitat (ver Figura 13).
3. Análisis de hábitats viables: Como se indicó, las curvas de preferencias hidráulicas permiten establecer los hábitats viables, en función de los resultados del índice LIFE. Estos se corresponden con las diferentes unidades hidromorfológicas (mesohábitats): cascada, poza, plano, rápido, entre otros. Los resultados de distribución de los invertebrados son más válidos si se evalúa una mayor representatividad de unidades hidromorfológicas. Por esa razón, se recolectó un número 100 muestras.
4. Simulación del hábitat: Una vez obtenidas las preferencias hidráulicas, el hábitat de las especies objetivo son simuladas a través del método IFIM (“Instream Flow Incremental Methodology”). Esta metodología se aplicó por medio del programa RHYHABSIM (Jowett, 2009, referenciado en Rosero, 2011), derivado del programa PHABSIM (“Physical Habitat Simulation System”), el cual fue explicado en el capítulo sobre métodos de determinación de caudal ecológico. En la Figura 14 se muestra el sistema

operativo del programa y los datos de ingreso requeridos. La simulación de hábitat requirió de la entrada de datos sobre los aspectos hidráulicos y sobre las curvas de preferencia de las especies, para establecer una relación con el caudal.

5. Cálculo de Caudal Ecológico: En el programa PHABSIM se ingresaron las variables físicas hidráulicas de los diferentes transectos estudiados: velocidad de la corriente, profundidad y sustrato. De esa manera se obtuvo la manifestación de los cambios entre estos parámetros para varias celdas dentro de cada transecto (Figura 15). El programa unifica celdas y transectos para recrear la hidromorfología en la sección estudiada, y sobre esta extrapolar las características hidráulicas.

En la Figura 16, se presenta a manera de barras la combinación de las profundidades, velocidades de la corriente y forma del sustrato, que se expresa como Hábitat Viable en relación del caudal máximo del río Papallacta. Los cuatro transectos representan las zonas que contienen la mayor cantidad de Hábitats Viables. Para el Taxón objetivo se presenta su distribución, de acuerdo a sus preferencias: hábitats con sedimentos grandes; velocidades elevadas y poca profundidad.

La modelación se realizó en diferentes rangos de caudales, según el régimen hidrológico histórico de datos diarios. De esa manera se logró determinar los caudales que presentan mayor cantidad de Hábitats Viables. Es decir que las variables relevantes del hidrograma (picos de crecidas y

sequias), permiten la formación de distintos hábitats. El Régimen de Caudales constituye una serie temporal de flujos, donde el Caudal Ecológico es aquel que muestra un mayor número de hábitats viables.

#### Resultados obtenidos:

El modelo muestra que el 63% de los hábitats del tramo estudiado en el río Papallacta son viables para el mantenimiento del taxón objetivo; incluso en la época seca, que es bastante marcada, se forman en el río microhábitats heterogéneos (pozas y rápidos) idóneos para la supervivencia de esta especie en dicha estación.

En cuanto a la simulación de hábitats, los resultados obtenidos indican que el número de hábitats preferenciales, en cuanto a velocidad de la corriente, tipo de sustrato y profundidad, incrementan con mayores caudales. También se muestra que los valores más altos de hábitats viables se presentan al inicio y al final de las crecidas de caudal.

Los hábitats viables óptimos para el taxón objetivo se encuentran en caudales de 0,5 m<sup>3</sup>/s hasta máximo un valor de 1,0 m<sup>3</sup>/s. En cambio, los hábitats se vuelven inviables en caudales de 0,3 m<sup>3</sup>/s o menores a este valor.

El estudio también indica que las velocidades de la corriente apropiadas para el desarrollo y supervivencia de este taxón y otros macroinvertebrados con hábitos similares, están dentro del rango de 0,8 m/s o más.

## Análisis del Caso de Estudio 2

El programa PHABSIM (o su modificado RHYHABSIM) es un método para determinar el caudal ecológico reconocido a nivel mundial, que ha tenido una gran aceptación. Eso se debe a que posibilita la incorporación de múltiples variables hidrológicas, hidráulicas y biológicas en el sistema. Por lo tanto, permite visualizar las interrelaciones entre las variables físicas y ecológicas, así como las áreas de hábitats viables para un taxón seleccionado dentro del cauce. En el caso de la cuenca del río Papallacta, la autora realizó un gran esfuerzo de varios años, con un número alto de muestreos, para tener un conocimiento amplio del ecosistema y del taxón “bandera” seleccionado. El estudio, por lo tanto, resulta ser bastante minucioso y utiliza varias herramientas para obtener toda la información requerida para las entradas del programa utilizado.

A diferencia de la tesis anteriormente descrita, este incluye variables hidráulicas que permiten determinar las áreas con hábitats viables para el taxón seleccionado; además de que incluye los datos de preferencias de hábitat. Sin embargo, considerando que la mayoría de cálculos de caudal ecológico se realizan con bajos presupuestos y tiempos muy reducidos, un estudio de esta magnitud resulta poco práctico, pese a que sería ideal. Aplicando el concepto de la Declaración de Brisbane, este carece de un análisis socioeconómico.

### **Caso 3: Microcuenca del río Machángara (Alomía y Chimbo, 2014)**

Este estudio fue realizado por Alomía y Chimbo (2014) en la Escuela Politécnica Nacional, y se trata de una tesis para la obtención del grado de Maestría en Ingeniería Ambiental; con el título Aplicación de una Metodología para Evaluar el Caudal Ambiental en Dos Proyectos Hidroeléctricos de Alta Montaña en Ecuador: Presas El Labrado y Chanlud de la Microcuenca del Río Machángara, Provincias del Azuay y Cañar.

#### Sistema(s) hídrico(s) estudiado(s):

El trabajo fue realizado en la microcuenca del río Machángara, donde existen captaciones de agua para generación hidroenergética y para abastecimiento de agua potable. En su parte alta la microcuenca se encuentra represada por los embalses Chanlud y El Labrado, pertenecientes a los proyectos hidroeléctricos de ELECAUSTRO.

#### Características biofísicas del(os) sistema(s) hídrico(s) estudiado(s):

La microcuenca del río Machángara posee una superficie 325,45 Km<sup>2</sup>, ubicada en las cabeceras de la gran cuenca Marañón Amazonas, que desemboca en el océano Atlántico. Su nacimiento se ubica en a una altitud de 4400 msnm, en la laguna Machángara Cocha. La microcuenca es un tributario del río Tomebamba, donde confluye en los 2400 msnm. Linealmente recorre unos 40,69

Km. En uno de sus tributarios, el río Chulco, existe otra captación hidroeléctrica de la central Saucay.

La topografía donde se asienta la microcuenca del Machángara es bastante irregular, con presencia de valles glaciares en la parte media y alta, taludes abruptos y valles angostos. En su porción baja, se presentan más bien colinas suaves y terrazas aluviales.

En cuanto al clima, a lo largo de la microcuenca se presentan tres tipos: nival, ecuatorial altoandino (dominante) y ecuatorial mesotérmico semihúmedo. La temperatura media mensual anual se encuentra entre 8,4 y 15,4°C.

#### Enfoque y objetivo:

Como se indica más adelante, el estudio tiene un enfoque básicamente hidrológico y, por lo tanto, no se presenta un taxón o grupo taxonómico objetivo de conservación. Sin embargo, el estudio analizó la riqueza y población de la comunidad de macroinvertebrados bénticos en la microcuenca del Machángara, como parte de la caracterización biótica del río.

Los autores se enfocaron en la comunidad de los macroinvertebrados bénticos debido a la importancia de este grupo faunístico en las relaciones ecológicas y porque son considerados indicadores de estado de conservación del río. Por otro lado, en la microcuenca del Machángara solo existen registros de truchas (*Oncorhynchus mykiss*) hasta los 3500 msnm, que son especies

introducidas, y de preñadillas (*Astroblepus* spp.) en baja abundancia y solo en quebradas pequeñas con buena calidad, hasta los 3200 msnm. Por lo tanto, la información de invertebrados es más amplia en la microcuenca.

#### Metodología aplicada:

El estudio de Caudal Ecológico se enfocó en responder a dos preguntas importantes para la determinación de los Caudales Ecológicos:

- ¿Qué ecosistema se quiere conservar?
- ¿Cómo evaluar los efectos de las reducciones de caudal?

Para responder a la primera pregunta, los autores realizan un diagnóstico físico, social y ambiental de la microcuenca. Esta información permitió un conocimiento amplio del sistema hídrico para poder identificar las características, problemática de la gestión, usos consuntivos y no consuntivos del agua, y las variables que de alguna manera influyen en su estado de conservación. Además, les permitió identificar la metodología más apropiada para determinar el Caudal Ecológico, según las características físicas, ambientales y sociales de la microcuenca del Machángara.

En cambio, para responder a la segunda pregunta, se realizó un análisis hidrológico completo similar al realizado por Moreno (2008) para la cuenca alta del río Pastaza, descrito más arriba (ver Figura 17). Es decir que el estudio de Caudal Ecológico propuesto tiene un enfoque básicamente hidrológico.

A continuación se detalla el procedimiento utilizado en este estudio:

1. Caracterización biofísica: a partir de información secundaria se realizó una caracterización biofísica completa, a partir de información secundaria, que incluyeron temas sobre ubicación geográfica, geología, topografía, hidromorfología, clima, conformación hídrica, calidad fisicoquímica del agua, sedimentos, suelos, aptitudes de uso del suelo, zonas de vida, áreas protegidas, vegetación y uso del suelo y fauna.
2. Caracterización de la zona biogeográfica: esto les permitió determinar zonas de características biogeográficas similares, para tener sitios de referencia comparativa en cuanto a características biofísicas.
3. Caracterización de las actividades antrópicas: también los autores realizaron una caracterización de las actividades antrópicas de la cuenca que incluyó temas como: división política, institucionalidad, concesiones y uso del agua, complejo hidroeléctrico, abastecimiento de agua potable (ETAPA), características de la población, actividades productivas, modificación del uso del suelo, riesgos de erosión y deslizamientos, problemas ambientales y oportunidades de mejoras en la gestión.
4. Caracterización biótica: ésta se centra en la comunidad biótica de macroinvertebrados bénticos y su riqueza de taxones, especialmente familias. Además, calcula dos tipos de índices de calidad del agua, BMWP

("Biological Monitoring Working Party") y ETP (basado en los órdenes Ephemeroptera, Trichoptera y Plecoptera), que utilizan a este grupo acuático como indicador. También incluye el cálculo del índice de biodiversidad de Shannon. Los resultados de los índices bióticos los relaciona y complementa con un estudio fisicoquímico del agua realizado a la fecha del estudio. Los parámetros analizados son: fosfatos, nitratos y oxígeno disuelto, los cuales permiten interpretar contaminaciones de tipo orgánico.

5. Hidrología del cauce: se realizó un registro histórico de caudales para obtener hidrogramas base y alterado, similar a lo realizado y descrito en Moreno (2008), con ciertas modificaciones. Esto permitió definir la duración de caudales, crecidas o avenidas habituales, mínimos anuales, caudal generador, entre otras características hidrológicas. Este análisis del régimen de caudales, les permitió a los autores obtener unos Caudales Ecológicos desde el punto de vista hidrológico. Estos Caudales Ecológicos resultantes del estudio son además comparados con el valor del 10% del flujo medio anual.
6. Desarrollo de relaciones ecológicas: al conocer las relaciones ecológicas dentro del ecosistema es posible identificar como cambia una característica biológica como la riqueza o la abundancia, cuando se modifica una variable física como el caudal o la calidad del agua. Para determinar las relaciones ecológicas se utilizó información secundaria sobre características hidrológicas, parámetros fisicoquímicos del agua y macroinvertebrados en

zonas biogeográficamente similares, las cuales están sometidas a diferentes niveles de alteración; desde zonas altamente conservadas, hasta zonas con intervenciones antrópicas de diferentes tipos: poblados, actividades ganaderas, industria y recreación.

7. Evaluación de Caudales Ecológicos: realiza una comparación entre los Caudales Ecológicos obtenidos mediante el método del 10% medio anual, el método de Tennant y el utilizado por Moreno (2008) para la cuenca alta del río Pastaza descrito antes. Esta comparación le permite determinar unos porcentajes de caudal que se aplicarían a las diferentes etapas hidrológicas del régimen anual.

#### Resultados obtenidos:

Los resultados de los valores de los Regímenes de Caudales Ecológicos de este estudio se observan en las Tablas 6, 7 y 8, por sitio de muestreo. Resumiendo estos resultados, en el sitio de la estación Saymirín en el río Machángara, debería pasar un Caudal Ecológico que va de 1,54 m<sup>3</sup>/s (noviembre) a 1,98 m<sup>3</sup>/s (febrero); en el sitio de la estación Chulco también en el río Machángara, de 1,37 m<sup>3</sup>/s (febrero) a 1,93 m<sup>3</sup>/s (mayo); y en el sitio de la estación Jayunguzo en el río tributario Chulco, de 1,01 m<sup>3</sup>/s (febrero) a 1,42 m<sup>3</sup>/s (mayo).

El estudio concluye que se requieren caudales base superiores al 10% del medio multianual; y que si bien existen períodos de tiempo en que existen

caudales inferiores a ese porcentaje, el ecosistema lo soporta pero por períodos cortos de tiempo.

Otra conclusión importante del estudio es que los índices bióticos de calidad del agua y de biodiversidad calculados fueron más altos en los ríos sin intervenciones por detracciones de caudal.

### Análisis del Caso de Estudio 3

Desde el punto de vista hidrológico, el estudio es bastante amplio y detallado como el primer caso analizado antes. A diferencia de éste, se realiza una completa caracterización del ecosistema acuático y las interrelaciones con los factores físicos y bióticos, información que le da un valor incorporado al trabajo. Lo que falta es relacionar los datos hidrológicos con los bióticos para la recomendación de caudales ecológicos.

Por otro lado, considerando el concepto de Caudal Ambiental (como se indica el título de la tesis), queda como un pendiente la información socioeconómica, especialmente sobre los usos que las comunidades humanas asociadas dan a la microcuenca. Cabe resaltar que la incorporación de los datos sociales a los estudios de Caudales Ecológicos resulta ser bastante complicada, y pocos son los métodos que lo permiten, como: (i) *Building Block Methodology* donde la evaluación la realizan expertos de varias disciplinas; (ii) ELOHA, en donde participan las comunidades y autoridades locales.

## 5. CONCLUSIONES

### 5.1 SOBRE LA TEORÍA DEL CAUDAL ECOLÓGICO

1. El concepto de Caudal Ecológico ha evolucionado con el tiempo. Las primeras aproximaciones se refieren a una mínima cantidad de agua que permita asegurar el mantenimiento de las especies acuáticas, principalmente de uso humano como los salmónidos.
2. El concepto más integral de Caudal Ecológico es el de la Declaración de Brisbane, que incorpora aspectos importantes como la cantidad, periodicidad y calidad del agua, incluye a todos los ecosistemas acuáticos continentales y además considera el bienestar humano del que dependen estos ecosistemas.
3. El término Caudal Ambiental, para varios autores es sinónimo de Caudal Ecológico. Sin embargo, otros autores los diferencian porque el primero considera para su determinación aspectos socioeconómicos. El Caudal Ambiental busca un consenso entre las demandas actuales y futuras del agua, y la conservación de la biota acuática y de los servicios ecosistémicos. Por lo tanto, el Caudal Ecológico es parte del Caudal Ambiental.
4. Las especies acuáticas se han adaptado a través del tiempo a las fluctuaciones de caudal inter e intra-anales; inclusive eventos extremos de crecida y sequía. Por lo tanto, el Caudal Ecológico debe considerar el

Régimen de Caudales Naturales; es decir que lo lógico es determinar un Régimen de Caudales Ecológicos o Ambientales.

5. Una sustracción de caudal en un ecosistema fluvial, está normalmente acompañado de una disminución de la calidad del agua, por aumento de temperatura, acumulación de materia orgánica, disminución del oxígeno y una concentración de elementos químicos y nutrientes. Por lo tanto, para la determinación del Caudal Ecológico o Ambiental se requiere analizar la calidad del agua y sus implicaciones debido a la intervención.
  
6. El Caudal Ambiental busca la integración de los requerimientos ambientales, económicos y sociales; por lo tanto, este se convierte en una herramienta de gestión del agua que tiene objetivos en común con la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, como son (GWP, 2005):
  - Sostenibilidad ambiental y ecológica: el agua debe ser manejada de manera que no se deterioren los sistemas que sostienen la biodiversidad.
  - Equidad social: se debe reconocer el derecho de todas las personas a acceder al agua con cantidad y calidad suficientes y a sus recursos.
  - Eficiencia económica: el agua es un servicio ambiental que debe satisfacer la creciente demanda, por lo que debe manejarse con la mayor eficiencia económica posible, considerando su vulnerabilidad.

7. Así como ha evolucionado el concepto de Caudal Ecológico o Ambiental, las metodologías para su determinación también lo han hecho. Más de unas 200 metodologías han sido desarrolladas, con diferentes enfoques: hidrológico, hidráulico, hidrobiológico y holístico. Algunas combinan varios enfoques, dando lugar al nacimiento de nuevas especializaciones: la ecohidrología y la ecohidráulica.
  
8. La selección de una metodología para determinación de Caudales Ecológicos no es tarea fácil, pues no todas son aplicables a cualquier ecosistema fluvial, y aquellos que han dado buen resultado en un lugar no ha funcionado en otro, o ha requerido modificaciones.
  
9. Al momento de seleccionar una metodología para determinación de Caudales Ecológicos se deben considerar los siguientes aspectos:
  - El tipo de río a ser estudiado y sus características físicas, biológicas y sociales.
  - El objetivo que se espere alcanzar.
  - Grado de conflictividad socioeconómica y complejidad ecológica.
  - Disponibilidad de información.
  - Disponibilidad de tiempo y recursos económicos para los estudios.
  - Existencia de legislación, normatividad, políticas y estrategias nacionales.

10. Los métodos que pueden ser utilizados para determinar los requerimientos de caudal dependen de los diferentes objetivos de conservación, como son: la geomorfología, humedales, riberas y áreas de inundación, peces, pesquerías e invertebrados acuáticos.
11. En el Ecuador existe una legislación que regula el uso del agua desde diferentes aspectos, conceptualiza al Caudal Ecológico y establece la necesidad de respetarlo y mantenerlo. Sin embargo, únicamente la normativa para actividades hidroeléctricas especifica los parámetros que deben ser considerados para su cálculo y determinación. Para los demás proyectos que captan y extraen caudales de los ecosistemas acuáticos (riego y agua potable) no está implícita su obligatoriedad. Cabe recalcar que estas captaciones pueden llegar a ser más impactantes que los proyectos hidroeléctricos, porque no devuelven el caudal extraído al mismo cauce.
12. Para los proyectos de riego o agua potable, la legislación es flexible en cuanto a los métodos utilizados para determinar el Caudal Ecológico, siempre y cuando éstos sean aprobados por el SENAGUA y el MAE, como autoridades del agua y ambiental, respectivamente.
13. La legislación ecuatoriana relativa a proyectos hidroeléctricos establece el 10% del caudal medio multianual como Caudal Ecológico, pero únicamente para proyectos que están operando antes del año 2003; y establece la necesidad de realizar un monitoreo para asegurar que no se presenten

efectos indeseables en los ecosistemas acuáticos, aguas debajo de su captación.

14. Los ecosistemas de la región altoandina, como el páramo y sus humedales, son considerados imprescindibles en la regulación hídrica por su alta capacidad de almacenamiento de agua y formación de cuencas hidrográficas. Además, son ecosistemas frágiles cuya recuperación es a largo plazo y muchos impactos causados en esta zona son irreversibles. Por otro lado, muchas comunidades étnicas y ancestrales han vivido, y lo siguen haciendo, en una estrecha vinculación con los páramos. Por lo tanto, los ecosistemas fluviales altoandinos requieren un tratamiento especial, en cuanto a manejo y conservación.

15. Por las características topográficas del terreno, los sistemas acuáticos de la zona altoandina han sido intervenidos por muchas generaciones en proyectos de captación de agua: hidroeléctricos, de riego y de agua potable. Por lo tanto, la determinación de Caudales Ecológicos en estos ecosistemas importantes es imprescindible.

## **5.2 SOBRE LOS CASOS DE ESTUDIO**

16. Los estudios de Caudal Ecológico en la cuenca alta del río Pastaza (caso 1) y la microcuenca del río Machángara (caso 2) tienen un enfoque principalmente hidrológico. Se basan en la presunción de que la biota acuática y sus ciclos de vida son dependientes del Régimen de Caudales, y, por lo tanto, éste es un factor preponderante para su existencia. Los

estudios analizan varios de los componentes de Régimen de Caudales con una metodología hidrológica exhaustiva. Como resultado en ambos casos, el Régimen de Caudales Ecológicos calculado llega a tener valores superiores al 10% del caudal medio multianual.

17. En los tres casos de estudio la riqueza de especies de peces fue baja, y coinciden en la existencia de truchas introducidas, por lo que la utilización de las preferencias de hábitat se realizó en función de los macroinvertebrados bénticos, especialmente para los estudios realizados en la microcuenca del Machángara, así como en las de Guayllabamba y Papallacta.
  
18. Otros estudios revisados (Flachier, 2005; Fossati y Calvez, 2006) también coinciden en que el grupo que debería considerarse para los estudios de Caudal Ecológico en la zona altoandina, son los macroinvertebrados bénticos. Esto también resulta coherente considerando la teoría del Río Continuo de Vannote y colaboradores (1980), que muestran que la diversidad de macroinvertebrados bénticos es superior en las zonas altas de una cuenca hidrográfica, a diferencia de lo que ocurre con los peces. Por otro lado, esta comunidad biótica es indicadora del estado de conservación de los cuerpos de agua; además es un grupo ampliamente estudiado en cuanto a sus preferencias de hábitat. Por ejemplo, Gore y colaboradores (2001) han realizado amplios estudios sobre este tema para Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera; Gowns (1998) presenta diversas metodologías de determinación del Caudal Ecológico basado en invertebrados acuáticos.

19. Los tres casos de estudio también coinciden en que la calidad del agua es un aspecto importante a considerar dentro de la evaluación del ecosistema fluvial, pues este aspecto también determina la distribución, abundancia y riqueza de la biota acuática. También demuestran que la determinación de un valor o porcentaje fijo de Caudal Ecológico es inapropiado, y que el estudio debe proveer un Régimen de Caudales Ecológicos acorde al régimen natural hidrológico.
  
20. Si bien las metodologías utilizadas en los tres casos de estudio llevan a resultados interesantes, parece necesario complementar con el aspecto socioeconómico y un proceso de consulta (similar a lo propuesto por la metodología ELOHA), dada la gran importancia ecológica, social y de servicios ecosistémicos de la región altoandina.

## 6. RECOMENDACIONES

1. Dado que las condiciones y características de los ecosistemas fluviales tienen sus diferencias, parece conveniente que exista una flexibilidad en la legislación ambiental ecuatoriana para la selección y uso de la metodología de determinación del Caudal Ecológico. Sin embargo, se recomienda a nivel de Estado que se definan los criterios de evaluación para los otros tipos de captaciones de agua (riego y agua potable) y no únicamente para actividades hidroeléctricas. Se proponen los siguientes:

- Régimen natural de caudales del río que va a ser intervenido: debe considerar los caudales máximos y mínimos anuales e interanuales, así como los valores extremos y su período de retorno; de ser posible para un lapso mínimo de 20 años.
- Estructura hidrológica de la cuenca o microcuenca que va a ser intervenida: es importante determinar la sección crítica; es decir aguas abajo de la captación de agua hasta la unión con el primer tributario que aporte con un caudal apreciable, y permita en cierto nivel la recuperación del río intervenido. Por lo tanto, es importante conocer los regímenes naturales de caudales de todos los tributarios aportantes, especialmente aquellos que alimenten dentro de la sección crítica.
- Estructura biótica del río a ser intervenido: fundamentada mediante estudios biológicos (peces, macroinvertebrados bénticos, fitoplancton, etc.), que permitan determinar las comunidades existentes, especies

amenazadas, endémicas, exóticas y su abundancia poblacional. De este estudio se podrá seleccionar un(os) taxón(es) “bandera” u objetivo de conservación. El método seleccionado deberá considerar los requerimientos de hábitat del(os) taxón(es) seleccionado(s).

- Calidad del agua y sus variaciones interanuales: el caudal ecológico calculado podría ser adecuado según los requerimientos de hábitat de las especies acuáticas, sin embargo una baja calidad del agua causada por la reducción del líquido podría convertir al río en un ecosistema inviable. Por lo tanto, es necesario asegurarse que los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos se encuentran en concentraciones aceptables para la biota acuática.
  - Vinculación de las comunidades con el río a ser intervenido y otros usos del agua consuntivos y no consuntivos: entre los cuales se cuenta la pesca, riego, agua de consumo, rituales, recreación, atractivos turísticos (ej. cascadas), entre otros. Debe asegurarse que la reducción del caudal no interfiera severamente sobre estos usos del recurso.
2. En la actualidad gracias a los variados estudios ecohidrológicos y ecohidráulicos realizados, que han aumentado y mejorado los conocimientos de las dinámicas del ecosistema acuático, resulta descartable el establecimiento de un valor o porcentaje fijo de Caudal Ecológico. Estos métodos no consideran las fluctuaciones de caudal que son importantes para los ciclos de vida de las especies, la renovación de los sustratos, la dilución de contaminantes, la estabilidad de las riberas, la

formación de meso y microhábitats, entre otras dinámicas hidrológicas, hidráulicas, ecológicas e hidromorfológicas. Por lo tanto, se recomienda que se defina un Régimen de Caudales Ecológicos que simule las características del régimen natural hidrológico.

3. Los métodos utilizados en los casos de estudio realizados en zonas altoandinas, especialmente los estudios hidrológicos del régimen de caudales históricos y el cálculo de sus diferentes variables hidrológicas (crecidas, mínimos, índices de variabilidad, etc.), parecen muy recomendables. Comparaciones realizadas en ríos referenciales de similares características biogeográficas muestran que los resultados son coherentes. Sin embargo, se recomienda complementarlos con aspectos socioeconómicos, dada la gran importancia y vulnerabilidad de los cauces altoandinos.
4. Los estudios de Caudal Ecológico se realizan en ecosistemas acuáticos que van a ser intervenidos o que ya lo están siendo. Por lo tanto su objetivo debe estar encaminado en lograr un consenso entre las necesidades ecológicas y las humanas. Es importante entender cuál es el nivel tolerable de intervención en el río que permita tanto mantener la integridad del ecosistema como los usos humanos. Por esa razón, se recomienda que se utilicen metodologías más acordes al concepto de Caudal Ambiental, especialmente en la zona altoandina.
5. El estudio de Caudal Ambiental es realizado de manera técnica, con bases científicas rigurosas, acorde a la legislación, que permite demostrar el nivel

tolerable de intervención, mencionado en el punto anterior. Sin embargo, este debe constituirse además una herramienta para tomadores de decisión y partes interesadas de una cuenca. Por esa razón, se recomienda que los estudios estén acompañados de procesos sociales, como los propuestos en el método ELOHA.

6. Se recomienda que los estudios de Caudal Ambiental que sean realizados en zonas altoandinas utilicen las preferencias de hábitat para el grupo taxonómico de macroinvertebrados bénticos. Esta biota pertenece a los eslabones de base de la cadena trófica, responde rápidamente a los cambios del sistema o momentos de estrés y es indicadora del estado de conservación de los sistemas acuáticos. Por otro lado, el requerimiento total de agua de consumidores primarios y secundarios es la suma del requerimiento de cada uno de estos pequeños y numerosos individuos, pudiendo ser incluso superior al de los peces que habitan ese ecosistema. El estudio de Gore y colaboradores (2001) comparó las recomendaciones de Caudal Ecológico en Queens Creek (Carolina del Norte, USA), calculadas en base a los requerimientos del pez *Cottus bairdii*, con otros cálculos en base a macroinvertebrados bénticos. Como resultado, se debía incrementar en un 4,3% el volumen anual descargado para lograr suplir las necesidades de esta última comunidad biótica.
7. A pesar de lo indicado anteriormente, se recomienda que al inicio de los estudios también se realice un inventario de especies acuáticas ícticas, pues existe la posibilidad de que en el ecosistema fluvial subsistan peces

de importancia ecológica o especies que se encuentran en peligro o amenazadas. En este caso, éstas deben convertirse en el objetivo de conservación de la determinación del Caudal Ambiental.

8. La calidad del agua es un aspecto imprescindible al considerar el Caudal Ambiental, pues una reducción de cantidad de agua implica una concentración de contaminantes que podrían afectar severamente a las especies acuáticas. Por lo tanto, en ríos altamente contaminados se recomienda la utilización de metodologías más estrictas y la inclusión de un estricto plan de reducción de contaminantes y monitoreo de calidad del agua a largo plazo.
9. Relacionado a este mismo tema, en ríos “muertos”, donde no existe biota acuática debido a la introducción de contaminantes industriales, de minería, aguas negras y otros tóxicos, se recomienda que la determinación del Caudal Ambiental sea calculado en función de las especies que deberían potencialmente estar presentes en el ecosistema fluvial. Esto se logra mediante el estudio hidrobiológico de otros cauces ubicados en zonas de similitud biogeográfica que no se encuentran bajo intervenciones. Para esto se asume que el río tiene posibilidades de recuperación, de tomarse las medidas pertinentes.
10. Muchas de las recomendaciones anteriores se enfocan a ríos altoandinos, más no necesariamente pueden ser aplicadas a ríos amazónicos o costeros, donde la diversidad de especies de peces es más alta, y las

características hidrológicas e hidromorfológicas son bastante diferentes. Para este tipo de ecosistemas fluviales se requiere considerar otros criterios de análisis, como por ejemplo los requerimientos de peces migratorios o especies dependientes del agua, como nutrias, tortugas, patos de torrente, entre otros.

11. Dado que para los estudios de Caudal Ambiental es importante considerar los requerimientos de hábitat de las especies acuáticas, se recomienda que se realicen más estudios de investigación sobre estos temas. Cada vez incrementa más el conocimiento sobre especies acuática en el país; sin embargo, los estudios se centran en información taxonómica y de distribución biogeográfica. Pobre es el conocimiento actual sobre los requerimientos de velocidades de la corriente, caudales, profundidades preferenciales y ciclos de vida de las especies acuáticas, especialmente de peces. Si bien estos estudios requieren por lo mínimo unos dos años de esfuerzo científico, son indispensables para la determinación de Caudales Ambientales.

12. Los estudios de Caudal Ecológico o Ambiental se realizan principalmente por un requerimiento legal para obtención de licencias ambientales. Para esto se destinan recursos económicos y tiempo insuficiente como para poder definir con certeza los hábitats viables y óptimos de las especies acuáticas. Por lo tanto, se recomienda que los estudios incluyan planes de monitoreo a largo plazo, que permitan detectar a tiempo si el Caudal Ecológico o Ambiental establecido está cumpliendo con la función de

conservación de la integridad ecológica del río y el mantenimiento de los servicios ambientales.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acreman, M. y Dunbar, M. Defining environmental river flow requirements – a review. **Hydrology and Earth Systems Science**, 8(5):861-876, 2004.

Agència Catalana de l'Aigua. **HIDRI: Protocolo para la valoración de la calidad hidromorfológica de los ríos**. Agència Catalana de l'Aigua, 2006. 59 p.

Agirre, A. y de Bikuña B. **Conceptos básicos para la aplicación del caudal ecológico en los ríos ibéricos**. Barcelona: ANBIOTEK S. L., 2000. 8 p.

Alomía, I. y Chimbo, J. **Aplicación de una metodología para evaluar el caudal ambiental en dos proyectos hidroeléctricos de alta montaña en Ecuador: presas El Labrado y Chanlud de la microcuenca del río Machángara, provincias del Azuay y Cañar**. Tesis (Magíster en Ingeniería Ambiental). Escuela Politécnica Nacional, Postgrado en Ingeniería y Ciencias, 2014. 261 p.

Anderson, E., Encalada, A., Maldonado, J., McClain, M., Ortega, H. y Wilcox, B. **Environmental flows: a tool for addressing effects of river alterations and climate change in the Andes**. En: Climate change effects on the biodiversity of the tropical Andes: an assessment of the status of scientific knowledge. IAI-SCOPE publication, 2010. p. 326-338.

Aparicio, F. **Fundamentos de Hidrología de Superficie**. LIMUSA, Grupo Noriega Editores, 1992. 302 p.

Arias, V. y Terneus, E. **Análisis del marco legal e institucional para caudales ecológicos en el Ecuador**. SENAGUA / CEDA / UICN, 2012. 75 p.

Arthington, A. y Zalucki, J. (Eds.). **Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: review of methods**. Land and Water Resources Research and Development Corporation, 1998. 141 p.

Arthington, A., Tharme, R., Brizga, S., Pusey, B. y Kennard, M. **Environmental flow assessment with emphasis on holistic methodologies**. En: Welcomme, R. y Petr, T. (eds.). Proceedings of the second international symposium on the management of large rivers for fisheries, Volume II, 2004. p. 37-65.

Ballarín, D. y Rodríguez, I. **Hidromorfología fluvial, algunos apuntes aplicados a la restauración de ríos en la cuenca del Duero**. Valladolid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013. 128 p.

Beltrán, K., Salgado, S., Cuesta, F., León-Yáñez, S., Romoleroux, K., Ortiz, E., Cárdenas, A. y Velástegui, A. **Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador**. Quito: EcoCiencia, Proyecto Páramo Andino y Herbario QCA. 2009. 150 p.

Barrow, C. River basin development planning and management: a critical review. UK: **World Development**, 26(1):171-186, 1998.

Bradley, D., Cadman, D. y Milner, N. **Ecological indicators of the effects of abstraction and flow regulation; and optimisation of flow releases from water storage reservoirs**. UK: SNIFFER / Scottish Environment Protection Agency / Environment Agency / Northern Ireland Environment Agency, 2012. 252 p.

Bragg, O., Black, A., Duck, R. y Rowan, J. Approaching the physical-biological interface in rivers: a review of methods for ecological evaluation of flow regimes. **Progress in Physical Geography**, 29-4:506-531. 2005.

Brizga, S. **Methods addressing flow requirements for geomorphological purposes**. Capítulo 2. En: Arthington, A. y Zalucki, J. (Eds.). Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: review of methods. Land and Water Resources Research and Development Corporation, 1998. p. 8-46.

Buytaert, W., Célleri, R., De Bievre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J. y Hofstede, R. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. **Earth-Science Reviews**, 79:53-72, 2006.

Carrera, C. y Fierro, K. **Los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua, manual de monitoreo**. EcoCiencia, 2001. 65 p.

Castro, L., Carvajal, Y. y Monsalve, E. Enfoques teóricos para definir caudal ambiental. Colombia: Colciencias / Universidad del Valle, 2006. 27 p.

Chow, V.T. **Hidráulica de canales abiertos**. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A. 2004. 667 p.

Consuegra C. **Síntesis metodológica para la obtención de caudales ecológicos (Qe), resultados y posibles consecuencias**. Tesis (Maestría en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente). Bogotá, Colombia, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Postgrados en Ingeniería Civil, 2013. 153 p.

Convención de Ramsar. **Estrategia Regional de Conservación y Uso Sostenible de los Humedales Altoandinos**. Kampala: 9ª Reunión de la Conferencia de las Partes Contratantes en la Convención sobre los Humedales Ramsar, 2005. 34 p.

Crespo, P., Céleri, R., Buytaert, W., Feyen, J., Iñiguez, V., Borja, P. y De Bievre, B. **Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems**. Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca / IAMGOLD / K. U. Leuven postdoctoral grant (PDM), 2009. 6 p.

De Oliveira, P., Steinitz-Kannan, M., Miller, M. y Colinvaux, P. Las Diatomeas del Ecuador: III Diatomeas fósiles de la laguna de Kumpak, provincia de Morona Santiago. **Revista Brasileira de Geografía**, 24:41-60. 1987.

DFO. **Framework for Assessing the Ecological Flow Requirements to Support Fisheries in Canada**. Ontario: DFO / Canadian Science Advisory Secretariat, Reporte 017, 2013. 15 p.

Díaz-Quirós, C. y Rivera-Rondón, C.A. Diatomeas de pequeños ríos andinos y su utilización como indicadores de condiciones ambientales. **Limnología Caldasia**, 26(2):381-394, 2004.

Diez, J. M. y Burbano, L. Tecnología ecológica para la planificación de cuencas hidrográficas: regímenes caudales ambientales. España: **Revista de la Facultad de Ciencias Agropecuarias**, Universidad de Valladolid, 5(2): 20-31, 2007.

Diez, J. M. **Evaluación de Caudales Ecológicos: Metodología IFIM-PHABSIM**. Entrenamiento y Transferencia de Tecnología. Universidad de Valladolid / Tractebel-Caminosca, 2011. 184.

Doyle, M., Stanley, E., Strayer, D., Jacobson, R. y Schmidt, J. Effective discharge analysis of ecological processes in streams. **Water Resources Research**, 41:1-16, 2005.

Dyson, M., Bergkamp, G. y Scanlon, J. **Flow: the essentials of environmental flows**. Gland: Water and Nature Initiative / IUCN. 2003. 134 p.

ENDESA. **Introducción al cálculo de caudales ecológicos, un análisis de las tendencias actuales**. Santiago de Chile: ENDESA, 2011. 180 p.

Environmental Flow Conference. **The Brisbane Declaration**. Brisbane: Décimo Simposio Internacional de Ríos y Conferencia Internacional de Caudales Ambientales. 7 pp. 2007.

Flachier, A. **Determinación del caudal ecológico del río Yanuncay, Cuenca, Ecuador**. Reporte Técnico. ETAPA, Proyecto de Abastecimiento de Agua Potable Yanuncay, 2005. 42 p.

Fossati, O. y Calvez, R. **Requerimientos científicos para caudales ecológicos en ríos del sistema Papallacta, Ecuador**. Quito: EPMAAP / FONAG / IRD. 2006. 22 p.

García, D. y González, M. **El concepto de caudal ecológico y criterios para su aplicación en los ríos españoles**. Madrid: Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid. 1998. 10 p.

Gippel, C. y Stewardson, M. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows. **Regulated Rivers: Research & Management**, 14:53-67. 2008.

Girard, V. **AndeSim: Modélisation des habitats hydrauliques favorables aux invertébrés benthiques des rivières andines d'Équateur - Méthodologie**. EPMAAP / FONAG / IRD, 2008. 21 p.

Gómez, N., Donato, J. C., Giorgi, A., Guasch, H., Mateo, P. y Sabater, S. **La biota de los ríos: los microorganismos autótrofos**. Separata del capítulo 12. En: Elosegi, A. y Sabater, S. Conceptos y técnicas en ecología fluvial. Primera Edición, España: Fundación BVA, 2009. p. 219-242.

Gore, J., Layzer, J. y Mead, J. Macroinvertebrates instream flow studies after 20 years: a role in stream management and restoration. **Regulated Rivers Research and Management**, 17:527-542, 2001.

Growns I. **Methods addressing the flow requirements of aquatic invertebrates**. Capítulo 6. En: Arthington, A. y Zalucki, J. (Eds.). Land and Water Resources Research and Development Corporation, 1998. p. 115-140.

GWP. **Planes de gestión integrada de recursos hídricos, manual de capacitación y guía operacional**. Cap-Net / GWP / UNDP, 2005. 107 p.

Homa, E., Vogel, R., Smith, M., Apse, C., Huber-Lee, A. y Sieber, J. **An Optimization Approach for Balancing Human and Ecological Flow Needs**. Anchorage, Alaska: Proceedings of the EWRI 2005 World Water and Environmental Resources Congress, ASCE, 2005. 12 p.

Izquierdo, M. y Madroñero, S. **Régimen de caudal ecológico, herramienta de gestión para conservar la biota acuática**. Universidad Militar Nueva Granada, Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 2013. 94 p.

Jacobsen, D., Schultz, R. y Encalada, A. Structure and diversity of stream invertebrate assemblages: the influence of temperature with altitude and latitude. **Freshwater Biology**, 38: 247–261, 1997.

Kendy, E., Apse, C. y Blann, K. **A practical guide to environmental flows for policy and planning**, with nine case studies in the United States. USA: The Nature Conservancy, 2012. 72 p.

King, J. y Louw, D. Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology. **Aquatic Ecosystem Health and Management**, 1(2):109-124, 1998.

King, J., Brown, C., y Sabet, H. A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers. **River Research and Applications**, 19: 619–639, 2003.

King, J., Tharme, R. y De Villiers, M. **Environmental flow assessments for rivers: manual for the building block methodology**. Edición actualizada.

University of Cape Town, Freshwater Research Unit / Water Research Commission, Reporte N° TT 354/08, 2008. 339 p.

MADS / ANLA. **Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental**. Bogotá:

Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2013. 66 p.

Maldonado, M., Maldonado-Ocampo, J., Ortega, H., Encalada, A., Carvajal-

Vallejos, F., Rivadeneira, J.F., Acosta, F., Jacobsen, D., Crespo, A. y Rivera-Rondón, C. **Biodiversity in Aquatic Systems of the Tropical**

**Andes**. En: Herzog, S., Martínez, R., Jørgensen, P. y Tiessen, H. Climate change and biodiversity in the tropical Andes. IAI / SCOPE, 2011. P. 276-294.

Martínez, C. y Fernández, J. **Régimen de caudales: definición del estatus**

**hidrológico y valoración de la alteración**. Madrid. Universidad de Hidráulica e Hidrología, EUIT Forestal, 2008. 17 p.

Martínez, C. y Fernández, J. **Conceptos y métodos sobre el régimen de caudales ecológicos**. Gobierno de España: Ministerio de Medio Ambiente

y Medio Rural y Marino, Dirección General del Agua, Confederación Hidrográfica del Tajo, 2010. 31 p.

Mena, P., Medina, G. y Hofstede R. (eds.). **Los páramos del Ecuador: particularidades, problemas y perspectivas**. Editorial Abya Yala / Proyecto Páramo. 2001. 45 p.

Mitchell, M. y Stapp, W. **Field Manual for Water Quality Monitoring**. Sexta Edición. Michigan: Thomson-Shore, Inc., 1993. 240 p.

Millennium Ecosystem Assessment. **A toolkit for understanding and action: protecting nature services, protecting ourselves**. Washington: Island Press, 2007. 23 p.

Moreno, M. **Metodología y determinación de caudales ambientales en la Cuenca del río Pastaza**. Tesis (Ingeniería Ambiental). Quito, Ecuador, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, 2008. 185 p.

Mulligan, M., Rubiano, J., Hyman, G., White, D., García, J., Saravia, M., León, J.G., Selvaraj, J., Gutierrez, T. y Sáenz-Cruza, L. The Andes basins: biophysical and developmental diversity in a climate of change. **Water International**, 35(5):472–492, 2010.

NEWVI Integral Solutions. **Estudio sobre Caudales Ecológicos**. En: SGCA / BM / GEF / MAE-PRAA / FONAG. Sistema de monitoreo para evaluar la disponibilidad de agua y evolución de los impactos asociados al cambio climático en la parte alta de la cuenca del río Guayllabamba y en las microcuencas Papallacta y Antisana. 2011. 61 p.

Molle, F., Wester, P. y Hirsch, P. **River basin development and management**. En: Molden D. Water for food, water for life: a comprehensive assessment

of water management in agriculture. London: IWMI / Earthscan. Capítulo 16: 585-624, 2007.

Nugra, F. **Caracterización de la ictiofauna dentro de la subcuenca del río Llaviuco**. Tesis (Maestría en Agroecología Tropical). Cuenca, Ecuador, Universidad Politécnica Salesiana, 2014, 134 p.

Parra, E. **Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales**. Tesis (Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos), Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, 2012. 21 p.

Pinilla-Agudelo, G., Rodríguez-Sandoval, E. y Camacho-Botero, L. Propuesta metodológica preliminar para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), Colombia. **Acta Biológica Colombiana**, 19(1):43-60, 2014.

Poff, N., Allan, J., Bain, M., Karr, J., Prestegard, K., Richter, B., Sparks, R. y Stromberg J. The natural flow regime, a paradigm for river conservation and restoration. **BioScience**, Vol. 47, 11:769-784, 1997.

Poff, N., Richter, B., Arthington, A., Bunn, S., Naiman, R., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B., Freeman, M., Henriksen, J., Jacobson, R., Kennen, J., Merritt, D., O'Keeffe, J., Olden, J., Rogers, K., Tharme, R. y Warner A. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. **Freshwater Biology**, 55:147-170, 2009.

Poff, N. y Zimmerman, J. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. **Freshwater Biology**, 55:194–205, 2010.

Pozo, J., Elozegi, A., Díez, J. y Molinero, J. **Dinámica y relevancia de la materia orgánica**. Separata del capítulo 10. En: Elozegi, A. y Sabater, S. Conceptos y técnicas en ecología fluvial. Primera Edición, España: Fundación BVA, 2009. p. 141-167.

Pusey B. **Methods addressing the flow requirements of fish**. Capítulo 4. En: Arthington, A. y Zalucki, J. (Eds.). Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: review of methods. Land and Water Resources Research and Development Corporation, 1998. p. 66-105.

Rebillard, V. **Détermination et mise en place de régimes réserves pour les cours d'eau**. Montpellier: École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts (ENGREF). 2006. 26 p.

Reiser, D., Wesche, T., Estes, C. Status of instream flow legislation and practices in North America. **Fisheries**, 14(2): 22-29, 1989.

Ríos-Pulgarín, M., Gil-Guarín, I., Barletta, M. y Mancera-Rodríguez, N. Effects of the hydrological cycle on the phycoperiphyton assemblage in an Andean foothill stream in Colombia. **Journal Lymnology**, 75(s1): 121-136, 2016.

Ritcher, B., Baumgartner, J., Powell, J. y Braun, D. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 10:1163-1174, 1996.

Roldán, G. y Ramírez, J. **Fundamentos de Limnología Neotropical**. Segunda Edición, Primera Reimpresión. Medellín: Editorial Universidad de Antioquía, 2010. 440 p.

Román-Valencia, C., Ruiz, R. y Barriga, R. Una nueva especie ecuatoriana del género de peces andinos *Grundulus* (Characiformes: Characidae). **Revista de Biología Tropical**, 53 (3-4): 537-544, 2005.

Rosero, D. **Estudio sobre Caudales Ecológicos**. En: BM / GEF / MAE / PRAA / FONAG. Sistema de monitoreo para evaluar la disponibilidad del agua y evolución de los impactos asociados al cambio climático en la parte alta de la cuenca del río Guayllabamba y en las microcuencas Papallacta y Antisana, 2011. 14 p.

Samboni, N., Reyes, A. y Carvajal, Y. Aplicación de los indicadores de calidad y contaminación del agua en la determinación de la oferta hídrica neta. **Ingeniería y Competitividad**, 13(2):49-60, 2011.

SIWI. **Securing Water for Ecosystems and Human Well-being: The Importance of Environmental Flows**. Stockholm International Water Institute, SIWI, 2009. p. 52.

Smith, T. y Smith, R. **Ecología**. 6ta Edición. Madrid: Editorial Pearson / Addison Wesley, 2007. 776 p

Steinitz-Kannan, M., De Oliverira, P., Miller, M. y Colinviaux, P. Las diatomeas del Ecuador: I diatomeas fósiles de la laguna de Cunro, Provincia de Imbabura. **Revista Geográfica Militar**, 26:7-35, 1988.

Terneus, E. y Vásconez, J.J. **Caracterización preliminar de los ecosistemas acuáticos de las cuencas del Río Oyacachi y la laguna de Muertepungu**. Fundación para la Investigación y Conservación de Ecosistemas Acuáticos AGUA, 2003. 45 p.

Tharme, R. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. **River Research and Applications**, 19:397-441, 2003.

The Nature Conservancy. **Límites ecológicos de las alteraciones hidrológicas, caudales ambientales para una gestión regional del agua**. TNC / Colorado State University / Griffith University / IWMI / University of Washington / US Forest Service / CWE / USGS / Center for Ecology & Hydrology / UNESCO-IHE. 2015. 4 p.

Unión Europea. **Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive**, Guidance Document No. 31. Unión Europea, Reporte Técnico 086, 2015. 106 p.

Vannote, R., Minshall, G., Cummins, K., Sedell, J. y Cushing C. The river continuum concept. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science**, 37:130-137. 1980.

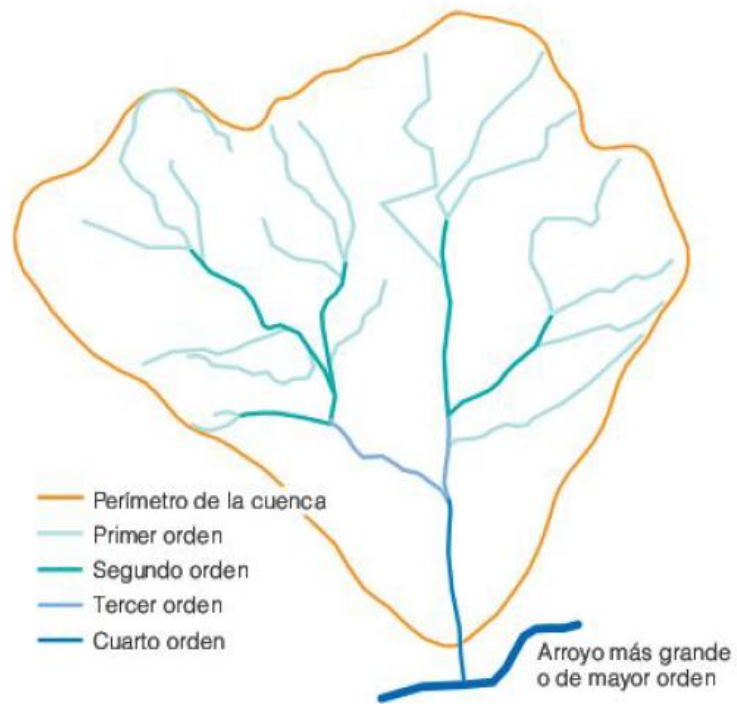
Verweij, M. A propósito del caudal ecológico. **Tribuna Neolectum**. Docs Pool, 2002. p. 1-4.

Vélez, J., y Ríos, U. **Corrientes naturales intervenciones y condiciones ecológicas**. Medellín: Seminario internacional sobre eventos extremos mínimos en regímenes de caudales: diagnóstico, modelamiento y análisis, 2004. 9 p.

World Meteorological Organization. **International glossary of hydrology**. WMO/UNESCO, 2012. 461 p.

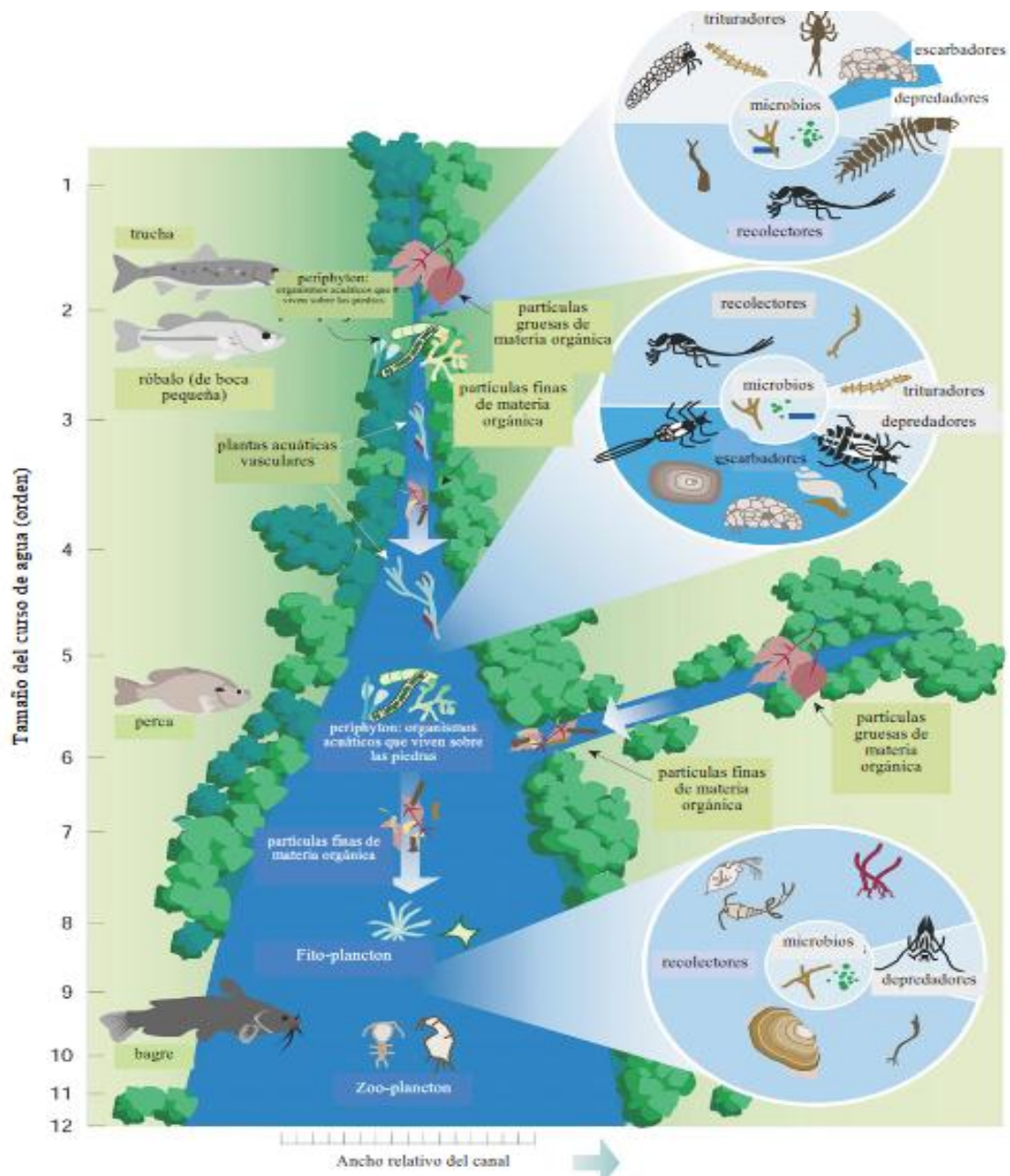
WWF. **Caudal ecológico: salud al ambiente, agua para la gente**. WWF Factsheet, 2010. 4 p.

## 8. FIGURAS



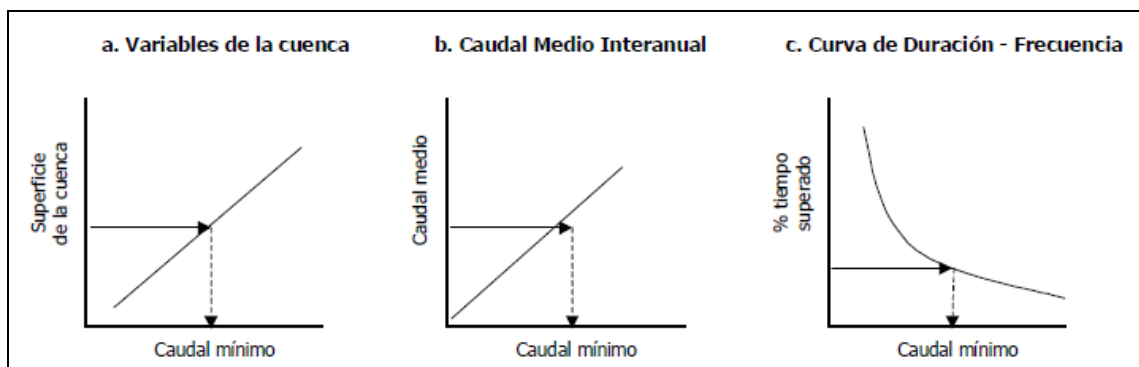
Fuente: Smith y Smith (2007)

**Figura 1. Órdenes de las corrientes dentro de una cuenca hidrográfica.** En celeste se observa los flujos de menor orden, y en azul más oscuro el flujo de mayor orden.



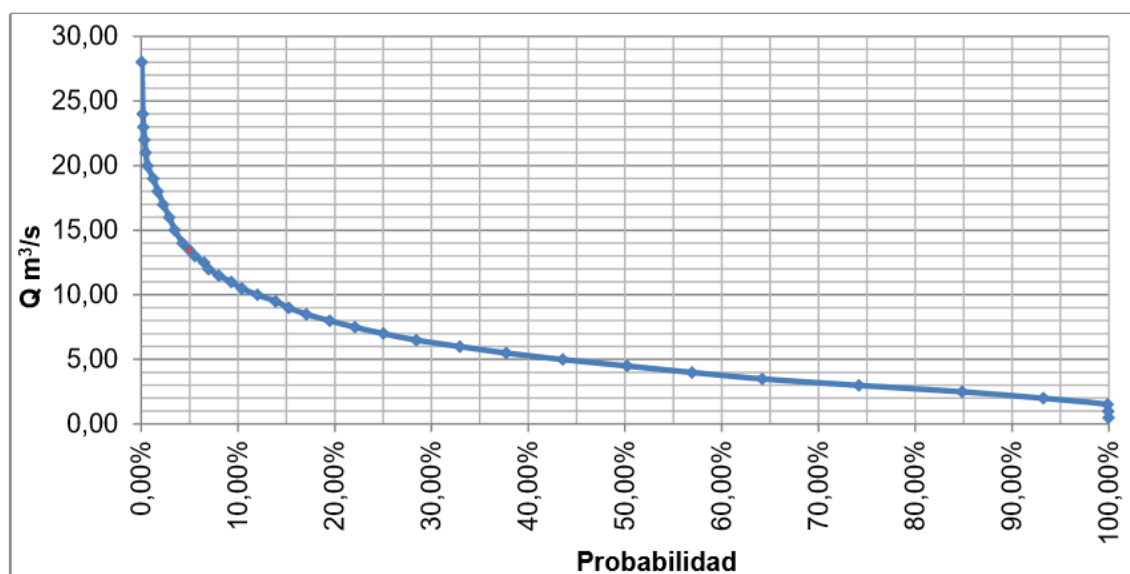
Fuente: Vannote *et al.* (1980)

**Figura 2. Río Continuo.** Representación de los cambios de las comunidades bióticas a lo largo de la cuenca hidrográfica.



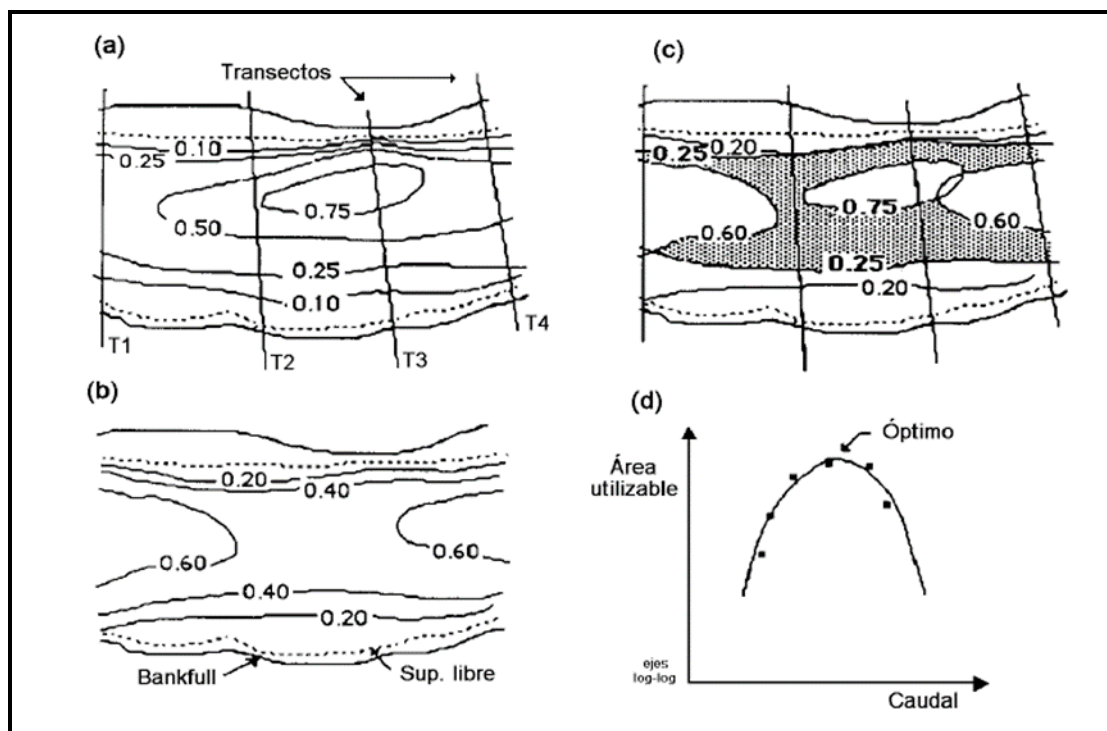
Fuente: Diez (2011)

**Figura 3. Métodos de establecimiento comunes de establecimiento de Caudal Ecológico con enfoque hidrológico.** a) en función de la superficie de la cuenca; b) en función de un caudal medio interanual; c) en función de la curva de duración de caudales.



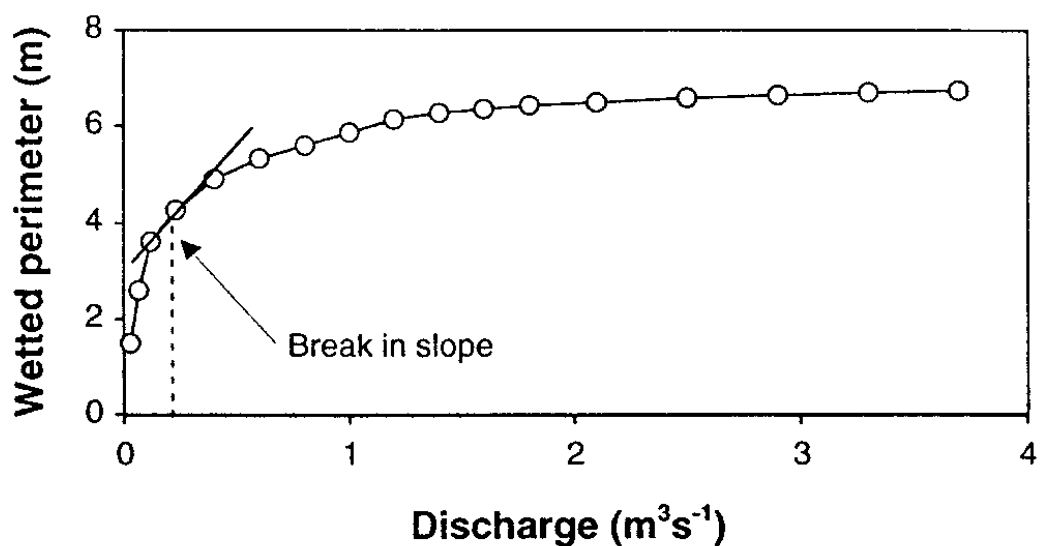
Fuente: Alomía y Chimbo (2014): CDC del río Machángara

**Figura 4. Ejemplo de una Curva de Duración de Caudales (CDC).** Q = caudal en  $m^3/s$ , y está en relación a la probabilidad (%) de ocurrencia en el lapso de tiempo analizado.



Fuente: Diez (2011)

**Figura 5. Método de Washington.** (a) levantamiento hidrotopográfico; (b) líneas isotacas (misma velocidad); (c) campo combinado profundidad-velocidad; (d) función caudal-área utilizable ajustada con puntos.



Fuente: Gippel y Stewardson (1998)

**Figura 6. Perímetro mojado (*wetted perimeter*).** Se observan los puntos de inflexión o *break in slope* en un caudal hipotético en  $m^3/s$ .

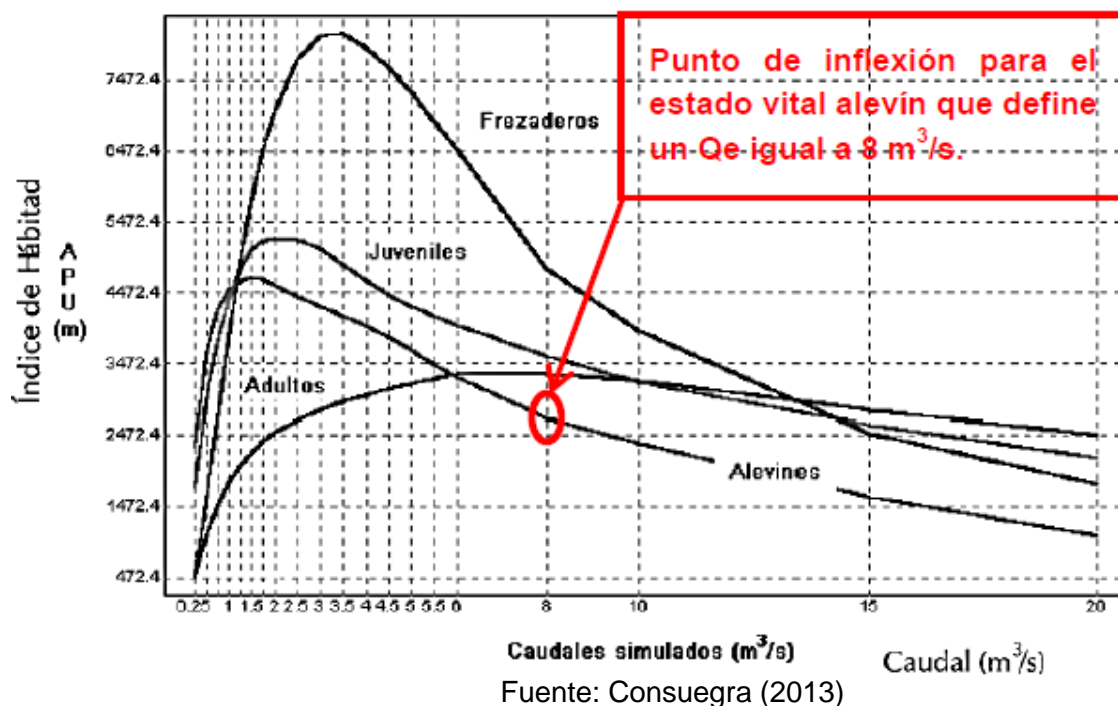
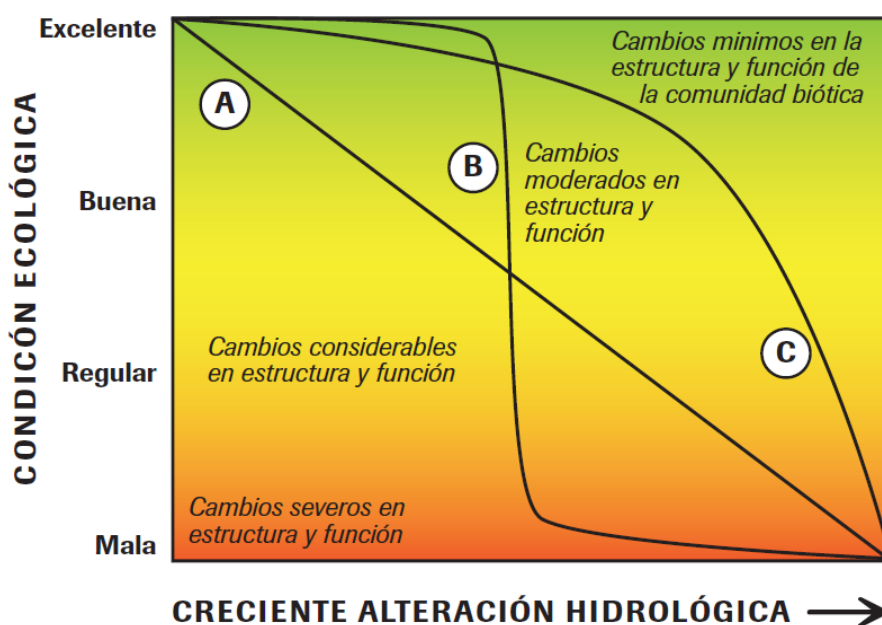
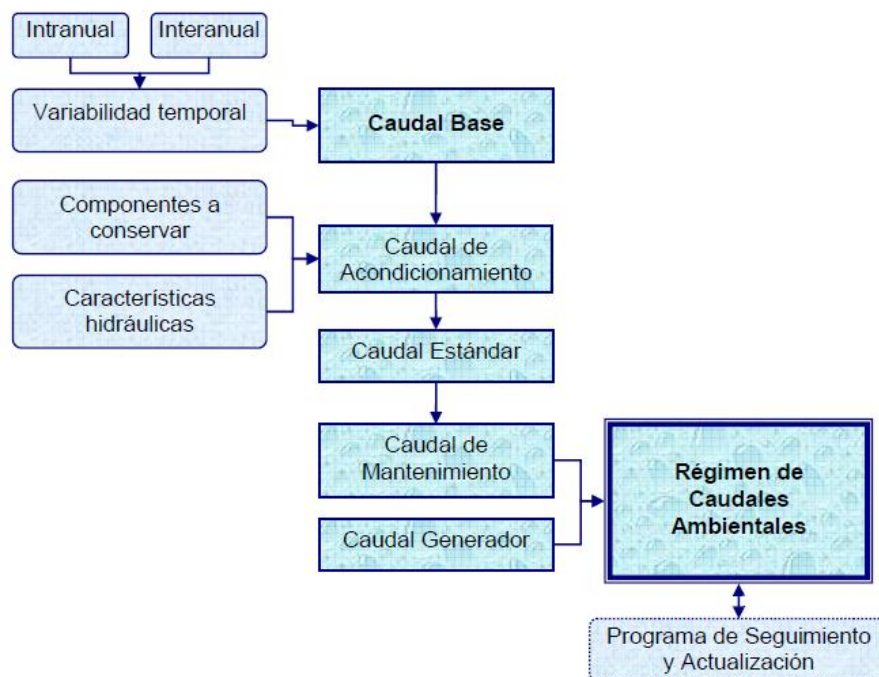


Figura 7. Método IFIM (Instream Flow Incremental Methodology). Relación entre caudal ( $Q$ ) y el Índice del Hábitad; ejemplo para los cuatro estadios de la trucha común (*Salmo trutta*).



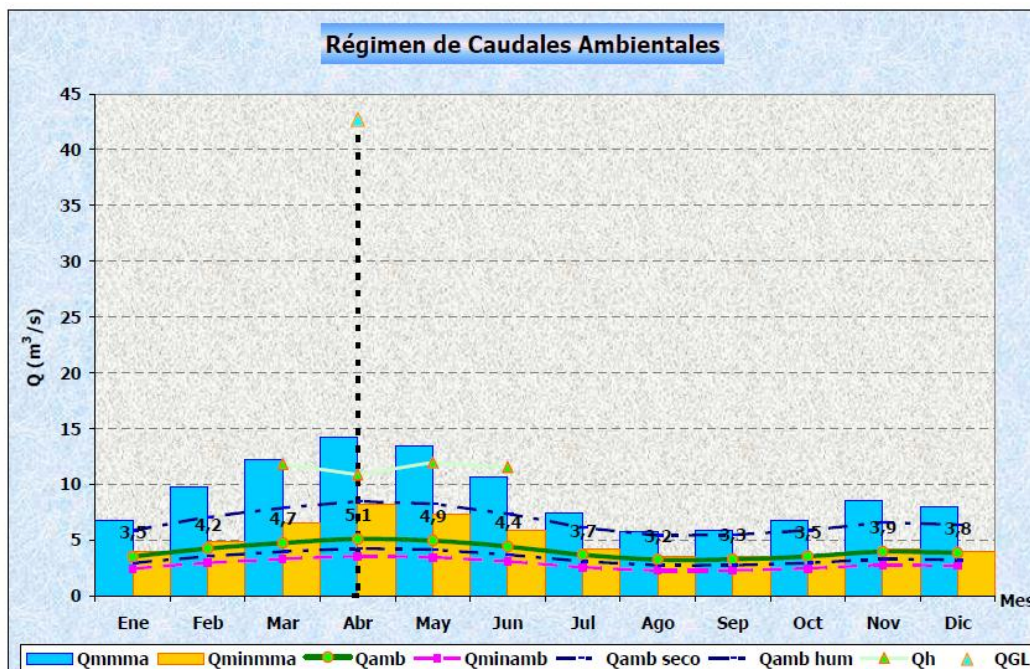
Fuente: The Nature Conservancy (2015)

Figura 8. Ejemplo de relaciones entre alteración de caudales y las respuestas ecológicas. (A) lineal, (B) umbral y (C) curvilínea. "La forma de la relación depende de las estadísticas ecológicas y de caudal específicas analizadas".



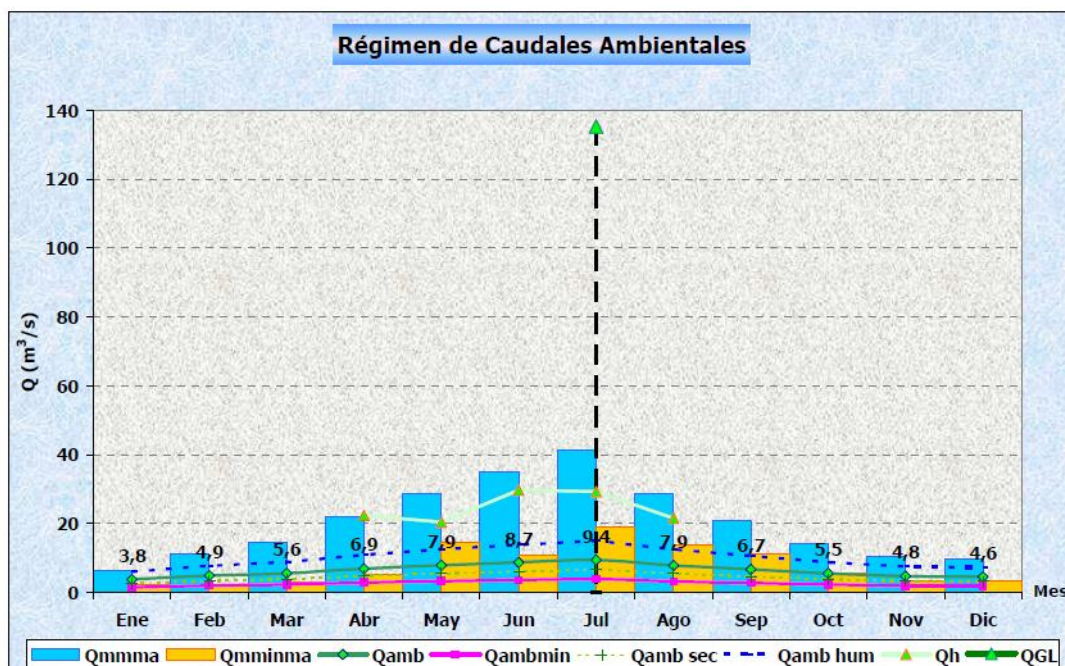
Fuente: Moreno (2008)

**Figura 9. Planteamiento metodológico de Moreno (2008).** Estudio de Caudal Ecológico en la cuenca alta del río Pastaza.



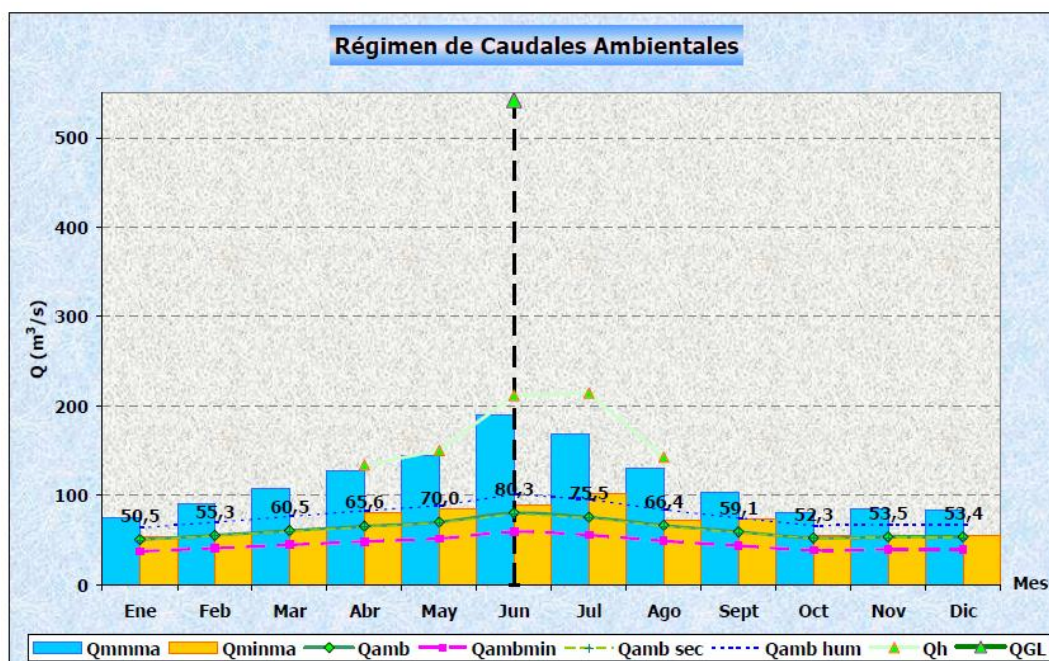
Fuente: Moreno (2008)

**Figura 10. Régimen de Caudales Ecológicos en el río Cutuchi, cuenca del río Pastaza.** Qmhma = caudal medio mensual multianual; Qminhma = caudal mínimo mensual multianual; Qamb = caudal ambiental; Qh = caudal habitual; QGL = caudal generator.



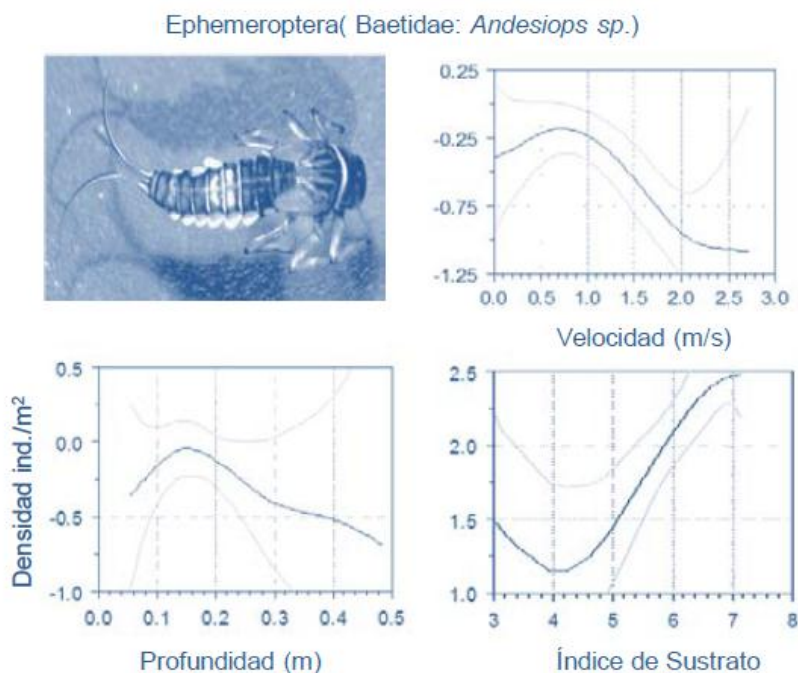
Fuente: Moreno (2008)

**Figura 11. Régimen de Caudales Ecológicos en río Cebadas, cuenca del río Pastaza.** Qmma = caudal medio mensual multianual; Qminma = caudal mínimo mensual multianual; Qamb = caudal ambiental; Qh = caudal habitual; QGL = caudal generador.



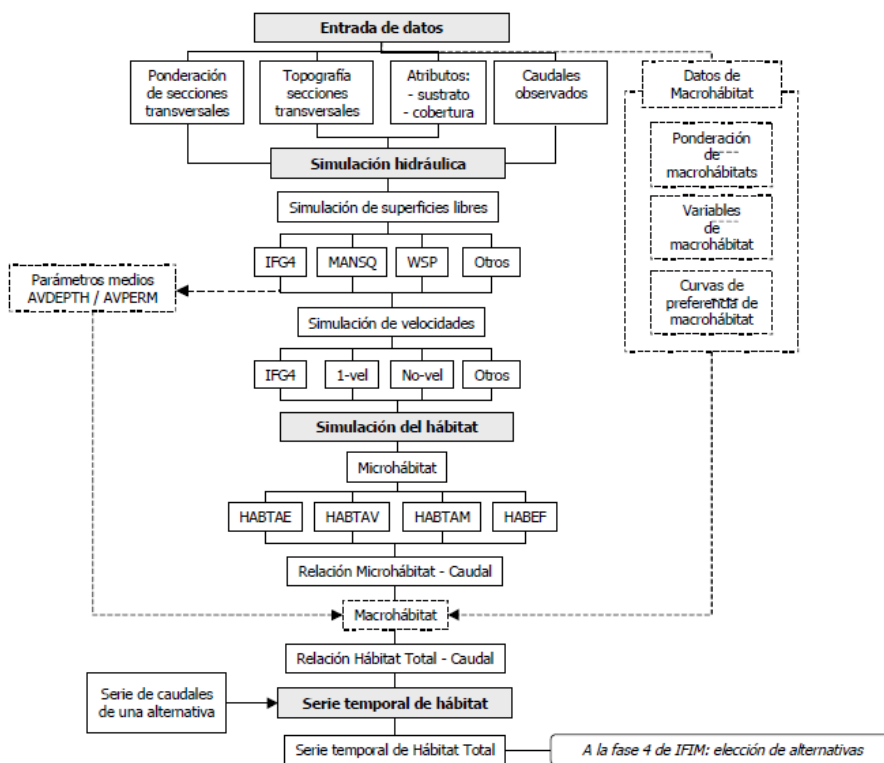
Fuente: Moreno (2008)

**Figura 12. Régimen de Caudales Ambientales en el río Pastaza (presa Agoyán).** Qmma = caudal medio mensual multianual; Qminma = caudal mínimo mensual multianual; Qamb = caudal ambiental; Qh = caudal habitual; QGL = caudal generador.



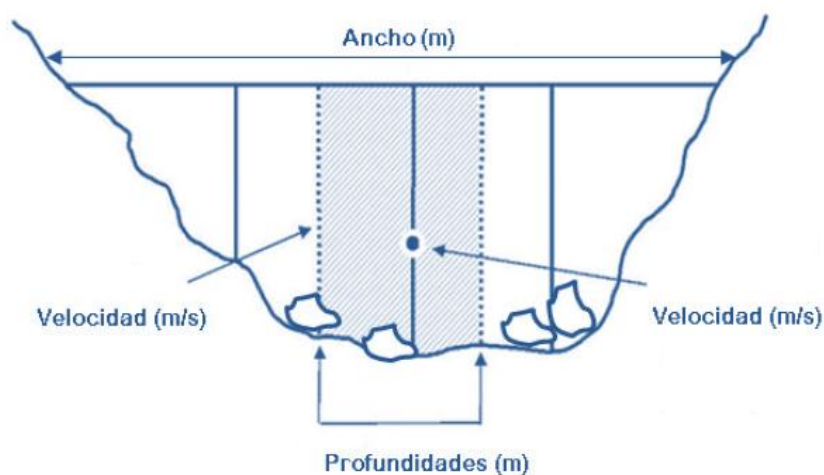
Fuente: Rosero (2011)

**Figura 13. Preferencias hidráulicas del género *Andesiops* de la familia Baetidae (Ephemeroptera).** Se observan las curvas de preferencias de velocidad, profundidad y sustrato (índice de Manning).



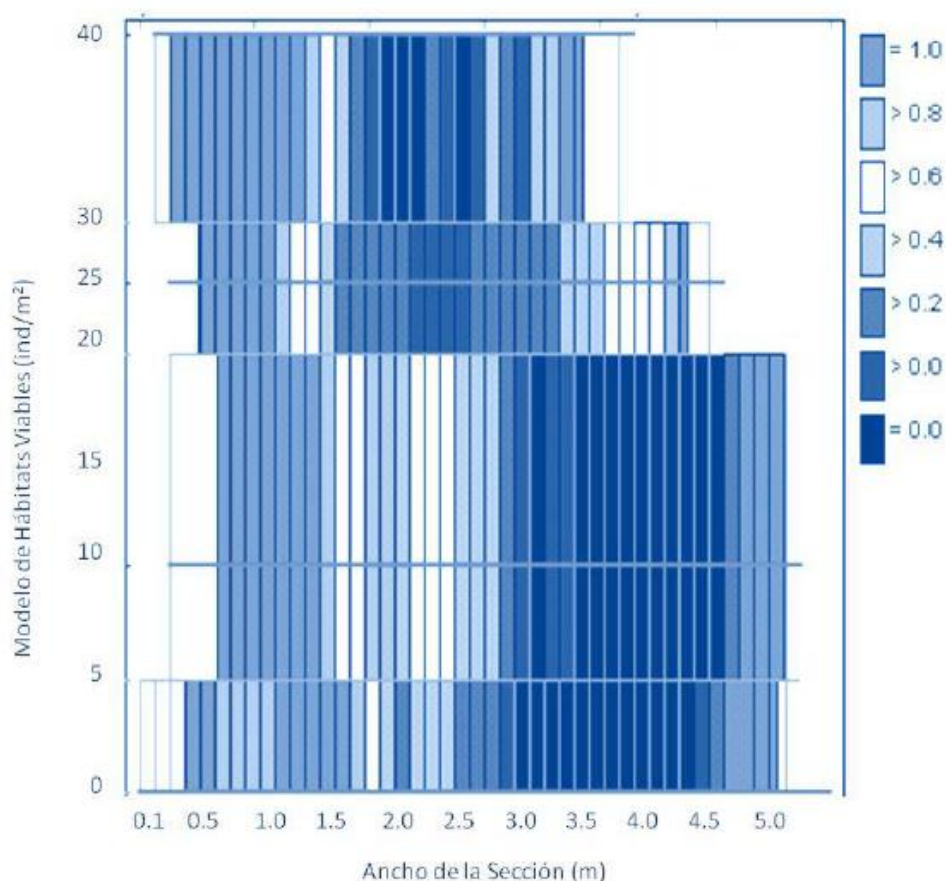
Fuente: Diez (2011)

**Figura 14. Esquema operativo del modelo PHABSIM.** Se presentan las entradas de datos que son requeridos por el programa.



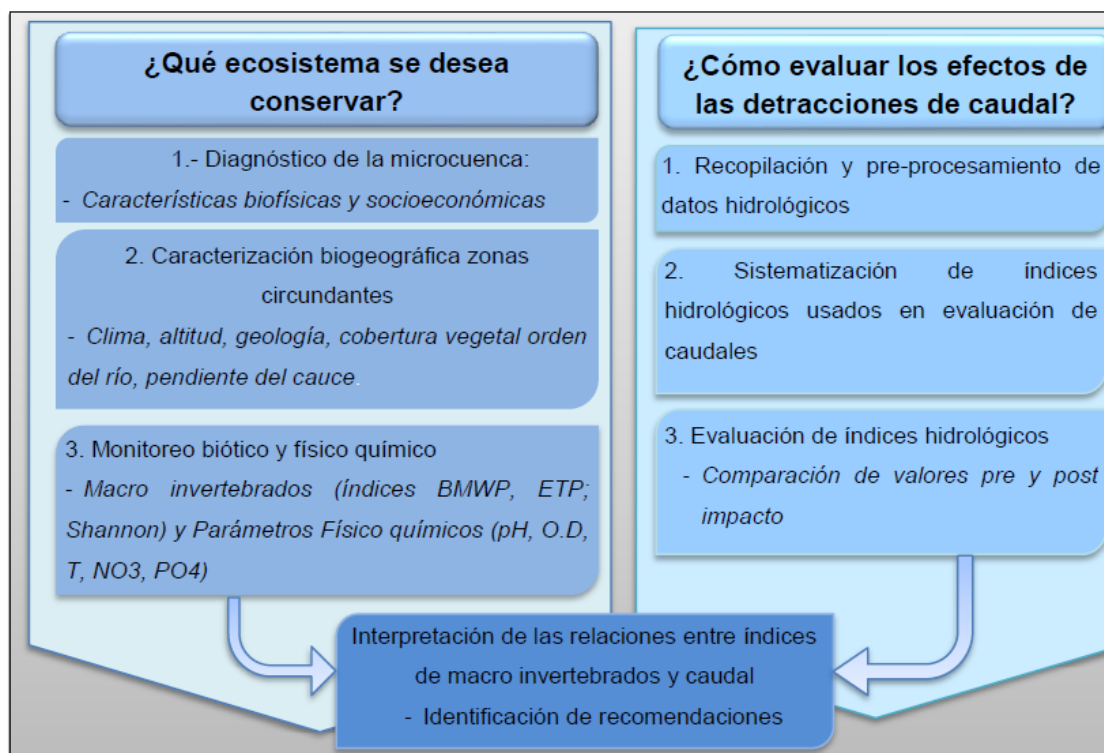
Fuente: Rosero (2011)

**Figura 15. Transecto de un río hipotético.** Se observa el seccionamiento en varias celdas, con sus respectivas velocidad, profundidad y ancho.



Fuente: Rosero (2011)

**Figura 16. Modelo de Hábitat Viabiles representado por barras.** Los hábitats óptimos para el género *Andesiops* (Ephemeroptera) son los representados con el valor de 1.0, para cada transecto estudiado.



Fuente: Alomía y Chimbo (2014)

**Figura 17. Diagrama conceptual de la metodología de Alomía y Chimbo (2014).** Etapas utilizadas para la evaluación de caudales en el estudio de la cuenca del río Machángara.

## 9. TABLAS

**Tabla 1. Método de Hoppe para calcular los caudales mínimos asociados a tres estrategias vitales de la trucha**

| Tipo de caudales     | % año $\geq$ | N° días $\geq$   |
|----------------------|--------------|------------------|
| Lavado del cauce     | 17           | Q <sub>62</sub>  |
| Freza - desove       | 40           | Q <sub>147</sub> |
| Producción y refugio | 80           | Q <sub>294</sub> |

Fuente: Diez (2011)

**Tabla 2. Índices de la Curva de Duración de Caudales a ser utilizados según objetivo**

| Índice de Flujo               | Objetivo  |
|-------------------------------|---|
| <b>Q<sub>95</sub></b>         | <p>Usado como índice de caudal mínimo o indicador de condiciones mínimas extremas.</p> <p>Condición mínima mensual en los puntos de descarga.</p> <p>Índice biológico que indica el caudal mínimo mensual.</p> <p>Usado para mantener la variación estacional mensual.</p>  |
| <b>Q<sub>90</sub></b>         | <p>Usado como índice de caudal base.</p> <p>Valor mensual que brinda condiciones de caudal estable.</p> <p>Caudal mínimo mensual para el hábitat acuático.</p> <p>Caudal crítico considerado como el caudal mínimo limitante.</p> <p>Describe las condiciones límite de la corriente y fue usado como un estimador conservativo de caudal base.</p> |
| <b>Q<sub>50</sub> mensual</b> | <p>Caudal base para el manejo y planeación del recurso.</p> <p>Usado para proteger la biota acuática.</p> <p>Mínimo caudal recomendado en río con represas.</p>   |

Leyenda: Q<sub>95</sub> = caudal ocurrido el 95% de tiempo

Fuente: Consuegra (2013)

**Tabla 3. Caudales Ecológicos según el método Tennant o Montana**

| Descripción        | Valores recomendados para Qe (%)        |              |
|--------------------|---|--------------|
|                    | Periodo húmedo                          | Periodo seco |
| Lavado o máximo    | 200                                     |              |
| Rango óptimo       | 60 - 100                                |              |
| Excepcional        | 40                                      | 60           |
| Excelente          | 30                                      | 50           |
| Bueno              | 20                                      | 40           |
| Regular            | 10                                      | 30           |
| Pobre o mínimo     | 10                                      | 10           |
| Degradación severa | 10 del caudal promedio al caudal mínimo |              |

Leyenda: Qe = Caudal Ecológico

Fuente: Consuegra, 2013000

**Tabla 4. Caudales Ecológicos según el método de la legislación Suiza**

| Aguas no piscícolas  | Aguas piscícolas |                        |                             |
|--|------------------|------------------------|-----------------------------|
|  | Qmin (l/s)       | Q <sub>347</sub> (l/s) | Qmin (l/s) Caudal adicional |
| 50 o el 35% del Q <sub>347</sub> si y sólo si Q <sub>347</sub> < 1 m <sup>3</sup> /s | ≤ 60             | 50                     | 8 l/s por cada 10 l/s       |
|  | ≤ 160            | 130                    | 4,4 l/s por cada 10 l/s     |
|  | ≤ 560            | 280                    | 31 l/s por cada 100 l/s     |
|  | ≤ 2500           | 900                    | 21,3 l/s por cada 10 l/s    |
|  | ≤ 10000          | 2500                   | 150 l/s por cada 1000 l/s   |
|  | ≤ 60000          | 10000                  | 0                           |

Leyenda: Qmin = caudal mínimo; Q<sub>347</sub> = caudal superado a los 347 días

Fuente: Consuegra (2013)

**Tabla 5. Método RVA, índices (32) utilizados para determinar el grado de alteración hidrológica**

| <b>Parámetro</b>  | <b>Cálculo</b>   |
|---|--|
| Magnitud de condiciones mensuales (12 parámetros)                         | Media o mediana de cada mes calendario   |
| Magnitud y duración de las condiciones extremas anuales (10 parámetros)   | Mínimo anual promedio de 1 día<br>Mínimo anual promedio de 3 días<br>Mínimo anual promedio de 7 días<br>Mínimo anual promedio de 30 días<br>Mínimo anual promedio de 90 días<br>Máximo anual promedio de 1 día<br>Máximo anual promedio de 3 días<br>Máximo anual promedio de 7 días<br>Máximo anual promedio de 30 días<br>Máximo anual promedio de 90 días |
| Duración de las condiciones extremas anuales (2 parámetros)               | Día Juliano del mínimo – 1 día<br>Día Juliano del máximo – 1 día   |
| Frecuencia y duración de impulsos altos/bajos (4 parámetros)              | Número de impulsos bajos anuales<br>Duración promedio de los impulsos bajos (días)<br>Número de impulsos altos anuales<br>Duración promedio de los impulsos altos (días)   |
| Rango / frecuencia de los cambios en la condición del agua (4 parámetros) | Proporciones de levantamiento: promedio de todas las diferencias positivas entre valores consecutivos diarios<br>Proporciones de caída: promedio de todas las diferencia negativas entre valores consecutivos diarios<br>Número de ascensos<br>Número de descensos   |

Fuente: Consuegra (2013)

**Tabla 6. Régimen de Caudales Ecológicos del río Machángara en la estación hidrológica Saymirín**

|       | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul   | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  |
|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| Qamb  | 1,54 | 1,98 | 1,73 | 1,52 | 1,79 | 1,65 | 1,54  | 1,74 | 1,69 | 1,68 | 1,77 | 1,91 |
| Qambs | 1,44 | 1,85 | 1,62 | 1,42 | 1,67 | 1,54 | 1,44  | 1,62 | 1,58 | 1,57 | 1,66 | 1,79 |
| Qambh | 1,81 | 2,33 | 2,03 | 1,78 | 2,10 | 1,94 | 1,81  | 2,04 | 1,99 | 1,42 | 1,42 | 1,42 |
| Qcmo  |      |      |      |      |      |      | 12,27 |      |      |      |      |      |
| Qh    |      |      |      | 3,24 | 4,58 | 3,50 | 3,20  | 4,32 | 4,98 | 4,55 |      |      |
| Qmin  |      |      |      |      |      |      | 0,80  |      |      |      |      |      |

Leyenda: Qamb = caudal ambiental; Qamb s = caudal ambiental en época seca; Qamb h = caudal ambiental en época húmeda; Qcmo = caudal de la máxima crecida ordinaria; Qh = caudal de crecidas ordinarias; Qmin = caudal mínimo.

Fuente: Alomía y Chimbo (2014)

**Tabla 7. Régimen de Caudales Ecológicos del río Machángara en la estación hidrológica Chulco**

|       | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul   | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  |
|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| Qamb  | 1,46 | 1,37 | 1,62 | 1,61 | 1,93 | 1,46 | 1,53  | 1,51 | 1,53 | 1,72 | 1,54 | 1,62 |
| Qambs | 1,29 | 1,21 | 1,43 | 1,41 | 1,70 | 1,28 | 1,35  | 1,33 | 1,35 | 1,52 | 1,36 | 1,42 |
| Qambh | 1,73 | 1,61 | 1,91 | 1,89 | 2,28 | 1,72 | 1,80  | 1,78 | 1,80 | 2,03 | 1,82 | 1,91 |
| Qcmo  |      |      |      |      |      |      | 10,23 |      |      |      |      |      |
| Qh    |      |      | 7,70 | 7,26 | 7,61 | 8,77 | 10,30 | 7,77 | 6,14 | 6,66 |      |      |
| Qmin  |      |      |      |      |      |      | 0,12  |      |      |      |      |      |

Leyenda: Qamb = caudal ambiental; Qamb s = caudal ambiental en época seca; Qamb h = caudal ambiental en época húmeda; Qcmo = caudal de la máxima crecida ordinaria; Qh = caudal de crecidas ordinarias; Qmin = caudal mínimo.

Fuente: Alomía y Chimbo (2014)

**Tabla 8. Régimen de Caudales Ecológicos del río Machángara en la estación hidrológica Jatunguzo**

|       | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Qamb  | 1,08 | 1,01 | 1,19 | 1,18 | 1,42 | 1,07 | 1,12 | 1,11 | 1,12 | 1,27 | 1,13 | 1,19 |
| Qambs | 0,53 | 0,49 | 0,58 | 0,58 | 0,69 | 0,52 | 0,55 | 0,54 | 0,55 | 0,62 | 0,55 | 0,58 |
| Qambh | 1,15 | 1,08 | 1,28 | 1,26 | 1,52 | 1,15 | 1,20 | 1,19 | 1,20 | 1,36 | 1,21 | 1,27 |
| Qcmo  |      |      |      |      |      |      | 7,41 |      |      |      |      |      |
| Qh    |      |      | 4,15 | 3,52 | 3,91 | 3,32 | 3,57 | 3,00 | 3,49 | 3,90 |      |      |
| Qmin  |      |      |      |      |      |      | 0,08 |      |      |      |      |      |

Leyenda: Qamb = caudal ambiental; Qamb s = caudal ambiental en época seca; Qamb h = caudal ambiental en época húmeda; Qcmo = caudal de la máxima crecida ordinaria; Qh = caudal de crecidas ordinarias; Qmin = caudal mínimo.

Fuente: Alomía y Chimbo (2014)

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, Adriana Leticia Flachier Troya, con C.C. 1709801409, autora del trabajo de graduación intitulado: “Análisis de Metodologías para el Estudio de Caudales Ecológicos, Casos de Estudio en los Ríos Altoandinos Ecuatorianos”, previa la obtención del grado académico de **LICENCIADA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tiene la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador a difundir a través del sitio web de la Biblioteca de la PUCE el referido trabajo de graduación, respetando las políticas de propiedad intelectual de la Universidad.

Quito, 21 de Noviembre de 2016

\_f) \_\_\_\_\_

CC# 1709801409