

Metodologías para la determinación de los caudales ecológicos en el manejo de los recursos hídricos

Several Methodologies To Determinate The Ecological Flow Regimes In Water Resources Management

Yolima del Carmen Agualimpia Dualiby*

Carlos Enrique Castro Méndez**

Resumen

En este artículo se presenta una síntesis cronológica de la legislación existente sobre el manejo apropiado de los recursos hídricos. Esta legislación es el reflejo de que en la política colombiana se ha tenido como objetivo lograr un manejo adecuado de estos recursos. Por otra parte, en el último proyecto de *Ley del Agua*, se define el caudal ecológico de las corrientes superficiales y se encarga al IDEAM establecer los lineamientos técnicos para su determinación; tarea urgente si se tiene en cuenta que siguen surgiendo proyectos que dependen del aprovechamiento del recurso hídrico superficial.

Éste no es un tema fácil de abordar, ya que se requiere de trabajo de campo, oficina, inversión económica, recurso humano de diferentes disciplinas, consecución de información, la cual no se tiene para todas las fuentes hídricas del país, entre otras actividades; pero a pesar de todos los inconvenientes algunas universidades vienen trabajando este tema para el que es urgente presentar alternativas de solución, consultando, en primera instancia, las investigaciones realizadas en otros países y su posible adaptabilidad a las condiciones de esta región.

Palabras clave:

caudal ecológico, IFIM, PHABSIM, caudal ambiental.

Abstract

Looking for a suitable water resources management, the colombian guideline has shown the intention of controlling in an appropriate way and it is reflected in the actual legislation and in this paper a chronological synthesis of that is presented. In the last project of “Ley del Agua”, the ecological flow is defined and the IDEAM is in charged of establishing the technical procedures for its calculation; this is an urgent work if it is considered that new projects continue appearing and they depend of the using of the superficial water resource.

It's not a topic easy to approach, it's needed of field work, office, economic investment, human resource of different disciplines, attainment of information, which it's not had for all the water sources of the country, among other activities, but despite all the disadvantages some universities come working this topic for which is urgent to present alternatives of solution, consulting in the first instance the investigations realized in other countries and their possible adaptability to the conditions of this region.

Key words:

ecological flow, IFIM, PHABSIM, environmental flow.

Fecha de recepción: 1 de junio de 2006.

Fecha de aceptación: 28 de septiembre de 2006.

* Ingeniera Civil (Universidad de la Salle) y Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hídricos (Universidad de los Andes). Profesora de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correos electrónicos: yagualimpia@terra.com.co y yagualimpia@udistrital.edu.co.

** Agrónomo (Universidad Jorge Tadeo Lozano), Especialista en Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas (Universidad Santo Tomás). Profesional Investigador. Correo electrónico: cecastro77@tutopia.com.co

Introducción

Uno de los propósitos de la política colombiana es la gestión de los recursos hídricos de forma controlada; muestra de ello es el proyecto conocido como *Ley del Agua*, el cual en su artículo 21 define el caudal ecológico de las corrientes superficiales como: “Los caudales mínimos que, de acuerdo con los regímenes hidrológicos, deberán mantener las corrientes superficiales en sus diferentes tramos, a fin de garantizar la conservación de los recursos hidrobiológicos y de los ecosistemas asociados”. En este mismo proyecto de ley se le delega al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) establecer los lineamientos técnicos para su determinación.

Hasta la fecha no se ha definido una metodología representativa para las condiciones colombianas, sin embargo,

se está trabajando al respecto. Ahora bien, tampoco se ha mostrado a la comunidad interesada en el tema resultados o avances sobre las investigaciones realizadas, hecho que causa preocupación, si se considera que actualmente se están presentando proyectos de aprovechamiento del recurso hídrico superficial.



Figura 1. Aspecto general del río Cuja en el sector el Molino entre Pasca y Fusagasugá Departamento de Cundinamarca. Fuente: Castro, 2006

Por esta razón el proyecto curricular Tecnología en Gestión Ambiental y Servicios Públicos, a través de su grupo de investigación PROGASP, se propuso trabajar en el tema con un grupo de profesionales de diferentes disciplinas. Los planteamientos que se presentan en este artículo hacen parte del proyecto de investigación *Alternativas metodológicas para la determinación del caudal ecológico en fuentes superficiales de agua como estrategia para un desarrollo sostenible* (ver figura 1), el cual busca despertar la conciencia en la comunidad en general sobre la importancia de realizar un aprovechamiento del recurso hídrico con responsabilidad para el beneficio de todos.

Conciencia en el manejo del recurso hídrico

A través de los años la humanidad ha sentido la necesidad de estar cerca de los cursos de agua para garantizar su supervivencia, es decir, siempre han sido el eje central de los asentamientos humanos y en donde prosperan las ciudades. No obstante, aún no se tiene claro si los nombres originarios de los territorios provienen de los ríos o éstos surgieron en el seno de las poblaciones que se asentaron en su cercanía.

Debido a que el agua es un elemento que bien puede causar enfermedad o bienestar, desde un principio se hizo necesario cuantificarla, valorarla o estimarla a lo largo de

los territorios; por este motivo surgieron variadas disciplinas del conocimiento que empezaron a buscar diferencias que, por su parte, permitieron caracterizar los movimientos de aguas desde las geoformas de alta montaña, hasta las zonas más bajas y aun en los mismos cauces de los ríos. El fruto de estas investigaciones se refleja en la legislación colombiana, pionera a nivel latinoamericano en la preservación de los recursos hídricos, incluso antes de la reunión de mandatarios en la cumbre de Río de Janeiro.

Sin embargo, esta legislación algunas veces, ha considerado temas ambientales que en sus comienzos fueron discutidos y aprobados y otros interpretados de forma errada, como es el caso de la Ley 4 de 1951, con el que se decretaba el uso de una zona forestal y que en su primer artículo dice textualmente: “Declárese de utilidad pública la zona forestal aledaña al río Otún y sus afluentes, ubicada en jurisdicción de los municipios de Pereira y Santa Rosa, Departamento de Caldas, zona fijada por funcionarios del Ministerio de Agricultura y Ganadería”.

Al tratar de subsanar errores como el que se acaba de mencionar y otros que invitaban a la ampliación de la frontera agrícola, en el año 1959 se crea la ley 2 *Sobre economía forestal de la nación y conservación de recursos naturales renovables*, la cual en su Artículo 2 menciona:

Se declaran Zonas de Reserva Forestal los terrenos baldíos ubicados en las hoyas hidrográficas que sirvan o puedan servir de abastecimiento de aguas para consumo interno, producción de energía eléctrica y para irrigación, y cuyas pendientes sean superiores al 40%, a menos que, en desarrollo de lo que se dispone en el artículo siguiente, el Ministerio de Agricultura las sustraiga de las reservas...

En este último párrafo se dejó una puerta abierta para levantar las reservas, este hecho se aprovechó para que se explotara el bosque natural, así como para ampliar los límites del cultivo de café. En el año 1993 con la ley 41 en su artículo 1 expresa: “Regular la construcción de obras de adecuación de tierras, con el fin de mejorar y hacer más productivas las actividades agropecuarias, velando por la defensa y conservación de las cuencas hidrográficas”. Los primeros distritos de riego fueron entregados en el año 1976 y se localizaban en el departamento de Tolima; con la creación de esta ley, veinticuatro distritos de riego fueron cedidos a la asociación de usuarios para su administración, con una extensión aproximada de 220.038 hectáreas y se hicieron innumerables estudios para pequeña irrigación en laderas.

Como parte de los compromisos adquiridos en la cumbre de Río, en Colombia nace la Ley 99 de 1993 con la que se crea el Ministerio del Medio Ambiente. En su artículo primero se dictan los *Principios generales ambientales* y se destaca lo siguiente:

- Las zonas de páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial.
- En la utilización de los recursos hídricos, el consumo humano tendrá prioridad sobre cualquier otro uso.
- Los estudios de impacto ambiental serán el instrumento básico para la toma de decisiones, con respecto a la construcción de obras y actividades que afecten significativamente el medio ambiente natural o artificial.

Esta ley es importante, porque allí se crean organismos controladores de proyectos, el sistema nacional ambiental y la inclusión de medidas mitigadoras en proyectos de desarrollo para que causen menores efectos ambientales nocivos.

En la Ley No. 388 de 1997 (Reglamentada por los Decretos: 211/97, 540/98, 879/98, 1420/98, 1052/98, 1504/98, 1507/98, 1599/98, 150/99, 297/99, 1198/99, 1686/2000) cuyos principales objetivos son:

- Armonizar y actualizar las disposiciones contenidas en Ley 9a. de 1989 con las nuevas normas establecidas en la Constitución Política, la Ley Orgánica del Plan de Desarrollo, la Ley Orgánica de áreas Metropolitanas y la Ley mediante la cual se crea el Sistema Nacional Ambiental.
- El establecimiento de los mecanismos que permitan al municipio en ejercicio de su autonomía promover el ordenamiento de su territorio, el uso equitativo y racional del suelo, la preservación y defensa del patrimonio ecológico y cultural localizado en su ámbito territorial y la prevención de desastres en asentamientos de alto riesgo, así como la ejecución de acciones urbanísticas eficientes.

En esta ley se destaca la descentralización del Estado a través de la autonomía de las entidades territoriales para que éstas velen por la conservación de los recursos naturales y para que ello se realice a través de estudios técnicos los cuales deben aclarar la toma de decisiones sobre un uso u otro; algunos de estos ejemplos son los planes de ordenamiento territorial y las agendas ambientales.

Con el crecimiento de las ciudades junto con la presión que ejerce la población sobre los recursos naturales, específicamente el agua, en junio de 1997 se crea la ley 373, la cual en su artículo 7 sobre consumos básicos y máximos dice textualmente:

Es deber de la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico, de las Corporaciones Autónomas Regionales y demás autoridades ambientales, de acuerdo a sus competencias, establecer consumos básicos en función de los usos del agua, desincentivar los consumos máximos de cada usuario y establecer procedimientos, tarifas y las medidas a tomar para aquellos consumidores que sobrepasen el consumo máximo fijado.

En el ámbito rural en el año 2002 se crea el decreto 1729, con el que se reglamentan apartes del código de recursos naturales y de la ley 99 de 1993 referidos a la ordenación de cuencas hidrográficas, allí se involucra el termino de:

Uso y manejo sostenible de los recursos naturales renovables, de manera tal que se consiga mantener o restablecer un adecuado equilibrio entre el aprovechamiento económico de tales recursos y la conservación de la estructura físico-biótica de la cuenca y particularmente de los recursos hídricos...

La gestión dirigida específicamente a la conservación y buen manejo de los caudales en función de la preservación de los ecosistemas acuáticos se esboza en toda su extensión en el actual proyecto de ley del agua que propone fijar el caudal ecológico para cada cuerpo de agua superficial o tramo y deja la posibilidad para realizar estudios técnicos que soporten las decisiones ambientales. Allí también se plantea que mientras los técnicos se preparan en los aspectos metodológicos, se considerará como tal el caudal de permanencia en la fuente durante el 95% del año, siendo una solución a priori a la espera de que se establezcan los criterios que debe fijar el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial con la autorización del Consejo Nacional del Agua.

Entre los proyectos de aguas de gran magnitud para desarrollarse en próximos años, se tiene la construcción del distrito de riego en el triángulo del Tolima, que se localiza entre los municipios de Coyaima, Natagaima y Purificación y cubre una extensión aproximada de 33.700 ha. De acuerdo con la propuesta de ley del agua, debe contar con un diseño especial que permita mantener la vida acuática en los ríos regulados.

Clasificación de las metodologías

Aproximadamente en la década del sesenta, en Estados Unidos surgió la preocupación por preservar los ecosistemas acuáticos de los salmones, especie de gran importancia económica para ellos; esto dio origen a una serie de investigaciones que aún continúan y se han extendido a otros países donde se han presentado problemas similares con especies propias de cada región, pero no se podría precisar su número.

Ahora bien, en cuanto a las metodologías desarrolladas éstas podrían ser agrupadas de diferentes formas, si se considera una de las más adecuadas: la clasificación de acuerdo con el tipo de variable utilizada.

Métodos basados en el análisis de registros históricos

Estos métodos también son conocidos con el nombre de métodos hidrológicos. Ellos permiten obtener de forma rá-

pidan los valores de caudal si se cuenta con buenos registros limnimétricos del tramo de estudio. De igual manera, no requieren de trabajos específicos de campo y en su utilización se asume que los caudales medios permiten el mantenimiento adecuado de las comunidades acuáticas.

Método de Tennant o de Montana

Fue aplicado en los Estados Unidos en la década del setenta y consiste en una recomendación de caudales mínimos basados en un conjunto de porcentajes de caudales medios anuales calculados para un aprovechamiento local y que son aplicados a diferentes porcentajes para los periodos octubre-marzo y para abril-septiembre. Las variables utilizadas son los periodos estacionales del año (húmedo o seco) y el caudal medio anual.

Este método es particularmente adecuado para un nivel de planeación regional y es el más utilizado en Estados Unidos. Asimismo, comprende las siguientes etapas:

- Determinación del caudal medio anual de aprovechamiento hidráulico local.
- Observación de cursos de agua durante los periodos en los cuales el caudal es aproximadamente 10%, 30% y 60% del caudal medio anual.

Tabla 1. Estimación del estado ecológico del río con base en el análisis de los caudales de mantenimiento

ESTADO ECOLÓGICO	RÉGIMEN DE CAUDALES RECOMENDADO (Porcentaje del caudal medio anual)	
	OCTUBRE-MARZO (SEMESTRE SECO)	ABRIL-SEPTIEMBRE (SEMESTRE HÚMEDO)
De descarga o máximo	200%	
Gama óptima de variación	60% -100%	
Excelente	40%	60%
Muy buena	30%	50%
Bueno	20%	40%
Débil o degradante	10%	30%
Pobre o mínimo	10%	10%
Degradación alta	0% -10% DEL CAUDAL MEDIO	

Fuente: Tennant, 1976

- Otros caudales podrán ser igualmente analizados, pero éstos permiten abarcar un rango de flujos que, de una manera general, sirven para la protección de los ecosistemas acuáticos y rupícolas de la mayoría de los cursos de agua.
- Utilización de la información obtenida para elaborar recomendaciones de caudales de mantenimiento en cursos de agua con base en la tabla 1.

Método de caudal base o de Nueva Inglaterra

Este método fue desarrollado en Estados Unidos por el Servicio de Pesca y Fauna en 1981. La recomendación de un caudal mínimo se basa en registros históricos de los caudales, a partir de la mediana calculada en el mes de agosto, que corresponde al registro más bajo, el cual constituye el caudal mínimo o básico por mantener a través de todo el año, con la excepción de los periodos de reproducción e incubación de especies piscícolas. En este periodo la mediana mensual o más baja para el caudal mínimo, corresponderá a la del caudal durante ese periodo, si es superior al caudal básico. Sin embargo el cálculo de la mediana sólo es válido para cursos de aguas naturales en donde exista un registro de caudales mayores a veinticinco años. En otras situaciones, en cursos de aguas naturales en los que se verifican derivaciones importantes en el tamaño de registros de caudales inferiores a veinticinco años, un caudal mínimo es un porcentaje de caudal definido en función del área de la cuenca hidrográfica (ver tabla 2). Cuando un caudal de agua es menor a lo definido en este criterio, corresponderá al instantáneo para ese mismo periodo. Las variables utilizadas en este método son los periodos estacionales del año, el caudal mínimo anual y el rendimiento de la cuenca.

Tabla 2. Estimación del caudal ecológico por el método de caudal base o de Nueva Inglaterra

ESTACIÓN DEL AÑO	PERIODOS DE REGISTROS HISTÓRICOS	
	Inferiores a 25 años (m3s-1/km2)	Superior a 25 años (a)
Abril a primera quincena de junio (b)	0,29	100% mediana de agosto (c)
Segunda quincena de junio a septiembre	0,04	100% mediana de agosto (c)
De octubre a marzo (b)	0,07	100% mediana de agosto (c)

Fuente: Loar y Sale, 1981; Russel, 1988, 1990

- Río natural, cuenca hidrográfica superior a 130 km², precisión superior o igual al 10 %.
- Periodo de postura o incubación. Si el caudal de agua es inferior al mes de agosto, entonces el caudal se debe verificar localmente con los cursos de agua.
- Si el caudal de agua es inferior al mes de agosto, entonces el caudal se debe verificar localmente con los cursos de agua.

Método de Northern Great Plains Resource Program (NGPRP)

El método norteamericano del programa de recursos de grandes planicies se desarrolló en 1964 para los ríos salmonícolas provenientes de las montañas rocosas del oeste de Estados Unidos. En la estimación de caudales mínimos se tienen en cuenta la postura y el crecimiento de los individuos y los flujos de descarga de lavados finos, se recomienda calcular los mínimos durante todos los meses del año, con base en la curva de duración de caudales durante el mes analizado. Este método no requiere de mucho trabajo de campo, puesto que las curvas de duración de caudales son obtenidas a partir de un registro de caudales medios diarios superior a veinte años, en el que los flujos de temporada seca se eliminan, ya que este método supone que las componentes biológicas más representativas de un sistema acuático son esencialmente mantenidas por las condiciones hidrológicas que se verifican en años normales y no para eventos extremos que ocurren durante periodos de corta duración¹. Un caudal mínimo recomendado para cada mes corresponde al que es excedido en el 90% del tiempo (o en el 84% del tiempo según Dougal, 1979 y Loar y Sale, 1981), exceptuando los meses de caudales máximos, en los cuales el mínimo recomendado corresponde al que es igualado o excedido en el 50% del tiempo². Las variables utilizadas en este método son los periodos estacionales del año y los caudales medios diarios.

Método de Hope

En 1975 Hope modificó el método norteamericano del programa de recursos de grandes planicies utilizando ecuaciones basadas en áreas de cuencas hidrográficas para lugares en donde no existían registros de caudales. El método se basa en porcentajes de curvas de duración de caudales medios diarios y en las etapas del ciclo de vida de las especies; siendo desarrollado inicialmente para especies salmonícolas. El flujo que es igualado o excedido el 40 % del tiempo,

es el caudal recomendado para la postura, mientras que el flujo que es igualado o excedido el 80% del tiempo es el recomendado para el crecimiento. El flujo que es igualado o excedido el 17 % del tiempo es considerado un caudal de descarga para un periodo de 48 horas³. Las variables utilizadas en este método son los caudales medios diarios y el ciclo biológico de las especies.

Método 7Q10

Chiang y Jonhson⁴ (1976) recomendaron los caudales ecológicos basados en caudales medios mínimos observados durante un intervalo de tiempo de siete días, con un periodo de retorno de diez años. Este método es una variación del que inicialmente fue denominado 7Q2 y utiliza los mismos criterios, fue desarrollado para un periodo de retorno de dos años. Las variables utilizadas en este método son los caudales medios mínimos diarios.

Método de Arkansas

Fue desarrollado a partir del método de Tennant considerando varias especies piscícolas y dividiendo el año hidrológico en tres periodos en función de las características físicas y biológicas de los cursos de agua. Un caudal ecológico es definido como la base mensual correspondiente a un porcentaje del caudal medio mensual en cada periodo del año. Con base en lo anterior, para el periodo de caudales elevados (noviembre a marzo) es recomendable el 60% del caudal medio mensual, para una época de desove (abril a junio) sería el 70% y para el periodo de caudales bajos (junio a octubre) el 50% de este mismo caudal⁵. La aplicación de este método produce estimaciones muy altas del caudal ecológico para cursos de agua salmonícolas. Las variables utilizadas en este método son los periodos estacionales del año, el ciclo biológico de las especies y los caudales medios mensuales.

Método de Texas

Fue desarrollado para el área de Texas (estado semiárido de los Estados Unidos) y define un porcentaje variable de mediana mensual de forma que considera las características hidrológicas y biológicas de cursos de agua no salmonícolas, pero sí las especies lóxicas obligatorias como especies indicadoras, en un índice hidrológico que refleje el régimen de caudales de los cursos de agua. Otros factores también tenidos en cuenta son las diferencias regionales a nivel de

¹ Wesche y Richard, 1980.

² Loar y Sale, 1981.

³ Wesche y Richard, 1980; Loar y Sale, 1981.

⁴ Loar y Sale, 1981.

⁵ Filipeck et al., 1987 en Mathews Jr y Bao, 1991.

diversidad específica, las estadísticas más apropiadas para medir la tendencia central de los registros históricos de caudales, en este caso es un elemento cuyos valores son más bajos que las medias aritméticas y han mimetizado el modelo estacional de flujo base⁶. Las variables utilizadas en este método son las características hidrológicas y biológicas, la diversidad específica y los caudales medios mensuales.

Método de Caudal base

Fue desarrollado para cursos de agua del río Cataluña (Norte de España) con base en un conjunto de cursos de agua representativos de varios tipos de regímenes hidrológicos que caracterizan la región, normalmente, son regímenes permanentes o temporales con características mediterráneas o no⁷.

Este método considera que el caudal es la única variable independiente del ecosistema y que la información contenida en series hidrológicas permitirá mantener las relaciones de funcionalidad con las otras variables. Por otro lado, la comunidad piscícola y los macroinvertebrados constituyen las variables con mayor grado de dependencia, pero que son considerados de mayor sensibilidad y con mayor valor indicador para evaluar las alteraciones del ecosistema⁸. Las variables utilizadas en este método son las especies piscícolas, los macroinvertebrados y los caudales medios mensuales.

Métodos basados en características hidráulicas y de caudal

Se conocen también con el nombre de métodos basados en secciones transversales. Relacionan el caudal y las características físicas de los cursos de agua, como son el perímetro mojado, la velocidad y la profundidad del flujo, sin tener en cuenta las preferencias específicas del hábitat de las especies a lo largo del ciclo de vida; para ello se considera una o más secciones transversales en el tramo de estudio del río.

Uno de los aspectos más importantes de este tipo de métodos es la selección de una o más variables físicas que son directamente afectadas por la variación del caudal y que se constituyen en un factor limitante para las especies piscícolas u otras especies acuáticas. Se presume que un valor mínimo para estas variables permitirá la preservación integral del ecosistema⁹.

La aplicación de estos métodos involucra la definición de secciones transversales en zonas donde las variables seleccionadas son particularmente sensibles a las variaciones de caudal, siendo en cierto modo general definidas en lugares representativos de varios tipos de hábitat existentes localmente considerados críticos para una determinada especie¹⁰.

Estos métodos se caracterizan por la introducción de muchas técnicas simples de simulación y en ellos son utilizados modelos hidráulicos que permiten disminuir el trabajo de campo necesario, para así obtener las características específicas de cada sitio, normalmente la morfología de cursos de agua. Muchos de estos métodos difieren en la forma como son utilizados los datos de campo y no en cómo es tratada o utilizada la información¹¹.

La recomendación de caudales mínimos se define a partir de curvas de variación teniendo en cuenta la variable o variables hidráulicas en función del caudal según los siguientes criterios:

- *Criterio de mantenimiento de características físicas de hábitat.* Considera las diferencias existentes entre las características de hábitat para un caudal en análisis y para el caudal de referencia, para lo cual se asume que existen condiciones favorables para las especies acuáticas. Un ejemplo de este criterio es el perímetro mojado correspondiente al caudal máximo el cual no se le debe aplicar una reducción superior al 25%¹².
- *Criterio de punto de inflexión.* Consiste en encontrar un punto en la curva de respuesta de la variable hidráulica en función del caudal, por ejemplo el perímetro mojado en función del caudal, con el que se verifica una variación acentuada de declive. El caudal correspondiente a este punto es considerado como un referente por debajo del cual la calidad del hábitat es significativamente degradada. La desventaja principal del criterio del punto de inflexión es el carácter subjetivo que está asociado a la selección de este punto en la curva o debido a la existencia de varios puntos de inflexión¹³.

Los métodos basados en los análisis de registros históricos de caudal, presentan una desventaja relativa con respecto a los que consideran las características hidráulicas y de caudal, ya que, además, estos últimos tienen en cuenta las características específicas del lecho y, por lo tanto, el hábitat del tramo del río en estudio¹⁴.

⁶. Mathews Jr. y Bao, 1991.

⁷. Palau et al., 1995; Palau y Alcázar, 1996.

⁸. Palau et al., 1995.

⁹. Sale y Loar, 1981; Gordon et al., 1992.

¹⁰. *Ibid.*

¹¹. Sale y Loar, 1981.

¹². Bartschi, 1976 en Sale y Loar, 1981.

¹³. Annear y Conder, 1984.

¹⁴. Loar y Sale, 1981; Jowett, 1997.

Método de Colorado de la región 2 de U.S.F.W.S.

Este método fue desarrollado en 1993 para los ríos salmónícolos de las montañas rocosas del estado de Colorado, sudeste de los Estados Unidos por Russel y Mulvaney¹⁵. Este método se basa en una selección de áreas críticas, con sus respectivas secciones transversales, en donde se realiza una simulación hidráulica, para de esta forma obtener valores para el perímetro mojado, el área de sección transversal, para la velocidad media y para la profundidad, a partir de las cuales son definidas curvas de variación de los parámetros hidráulicos en función del caudal. De modo general, estas áreas corresponden a zonas menos profundas y rápidas del tramo en análisis¹⁶. Las variables utilizadas en este método son el perímetro mojado, la velocidad media y la profundidad.

Método de Idaho

Fue desarrollado por Cochnauer y White en 1975, para los grandes ríos de estado de Idaho en los Estados Unidos¹⁷. Este método se basa en la supuesta pérdida de hábitat debido a la disminución del caudal, teniendo en cuenta las características requeridas por las especies seleccionadas como indicadoras del hábitat. En este método se definen las áreas críticas para la libre circulación, reproducción y crecimiento de especies piscícolas; a su vez, en cada área crítica se determinan secciones transversales en las que se miden velocidad, profundidad y tipo de sustrato. La caracterización física de cada sección transversal es realizada una sola vez para el caudal más bajo. Se utiliza un modelo de simulación hidráulica, para generar los valores de profundidad, velocidad y perímetro mojado, para un amplio rango de caudales.

La comparación de las condiciones de hábitat simuladas con las necesidades de hábitat de las diferentes especies permite generar recomendaciones de caudales mínimos para la circulación, reproducción y crecimiento. Los caudales para la circulación sin restricciones de los individuos son basados en la profundidad mínima necesaria. Para la postura, el caudal que permite el ancho máximo disponible (valor medio obtenido de todas las secciones transversales) se usa como orientación para determinar el caudal mínimo. El caudal mínimo para el crecimiento de peces es determinado con base en el método de perímetro mojado. Las variables utilizadas en este método son el tipo de sustrato, la velocidad media, la profundidad y el perímetro mojado.

¹⁵ Wesche y Richard, 1980.

¹⁶ Wesche y Richard, 1980.

¹⁷ Gordon et al., 1992.

Método de la región 4 U.S.F.W.S

Fue desarrollado por Herrington y Dunham en 1967, para la recomendación de caudales mínimos que permitan el mantenimiento de las características generales del hábitat en las poblaciones residentes de salmonídeos en cursos pequeños de agua de montaña de los estados de Utah, Idaho y Wyoming del sudeste de Estados Unidos. Este método fue modificado posteriormente por Dunham y Collotzi en 1975¹⁸. La selección de los lugares se realiza a partir de fotografías aéreas y de mapas topográficos, para lo que son definidas al menos cinco secciones transversales en cada uno de los sitios seleccionados. La caracterización de éstos analizada para un caudal bajo y se considera los siguientes parámetros: profundidad, sustrato y características de las márgenes. Se utiliza un modelo de simulación hidráulica, para definir curvas de hábitat en función del caudal en las que se considera un porcentaje de hábitat relativamente óptimo, correspondiente al 100% del valor obtenido para un caudal de estiaje.

Las variables utilizadas en este método son los caudales mínimos, el tipo de sustrato y las características de las márgenes.

Método del perímetro mojado

En este método se asume que existe una relación directa entre el perímetro mojado y la disponibilidad de hábitat para las especies piscícolas¹⁹. Se definen secciones transversales en una o más zonas de rápidos donde se realizan por lo menos cinco mediciones de velocidad y profundidad del flujo, para que igualmente se pueda aplicar una modelación hidráulica. Se define un gráfico de perímetro mojado en función del caudal y se identifica el principal punto de inflexión de la curva, a partir del cual el aumento del caudal se traduce en un aumento poco significativo de perímetro mojado y un rápido deterioro de las condiciones de hábitat²⁰. El caudal correspondiente al punto de inflexión es el recomendado, si se considera como el caudal óptimo y si existen varias zonas de rápidos, se tomará el valor medio²¹. Sin embargo, con este método se corre el riesgo de que el conocimiento definido de velocidades y de profundidades asociadas al caudal definido no sean apropiadas para las especies en cuestión²².

¹⁸ Wesche y Richard, 1980.

¹⁹ Annear y Conder, 1984; Gordon et al., 1992.

²⁰ Spear y Currier, 1983; Gordon et al., 1992.

²¹ Annear y Conder, 1984; Gordon et al., 1992.

²² Orth y Maughan, 1982; Jowett, 1997.

La elección de rápidos, principal hábitat de macroinvertebrados bentónicos²³, que constituyen la fuente de alimentos de diversas especies piscícolas, normalmente salmonícolas, tienen por principio que la productividad bentónica esté directamente relacionada con la superficie mojada del lecho del río, representada en el perímetro mojado; sin embargo cualquier alteración de estas poblaciones afectará a las piscícolas.

Por otro lado, las zonas de rápidos se constituyen en sitios de paso para algunas especies y en zonas de postura y crecimiento de alevinos; son las zonas de cursos de aguas más afectadas por la disminución del caudal, aunque no definen un caudal de mantenimiento en dichas zonas, sí permitirán la circulación de aguas en zonas más profundas, que son normalmente preferidas por los adultos. El caudal recomendado por este método es en general excedido por el caudal medio diario en 60 a 90% del tiempo²⁴. Las variables utilizadas en este método son el tipo de sustrato, la velocidad media, la profundidad y el perímetro mojado.

Métodos basados en la relación hábitat y caudal

También se conocen con el nombre de métodos ecohidráulicos. Analizan secciones transversales del río, subdivididas en pequeñas celdas en las que se relacionan el hábitat y la velocidad del flujo con el objeto de evaluar los efectos que producen cambios incrementales de caudal en la estructura del cauce, la calidad del agua, la temperatura y la disponibilidad de hábitat físico utilizable a través de una combinación de datos hidráulicos, hidrológicos y biológicos²⁵; se consideran los métodos más avanzados para la determinación del caudal ecológico.

Método de WRRl Cover

Fue desarrollado por Wesche en 1973, para trucha (*Salmo Trutta*) en pequeños ríos de montaña, con caudales medios iguales o inferiores a 30 m³/s, basándose fundamentalmente en la cobertura²⁶. Se aplica en secciones transversales en tramos de cursos de agua en estudio, siempre que existan alteraciones significativas de sus características. En cada sección transversal se caracteriza el sustrato y se realizan mediciones de profundidad, caudal y ancho superficial del flujo, así como las mediciones de longitud de la cobertura de las márgenes y la profundidad del agua a ella asociada. La gama de caudales seleccionados varía entre el 10% y el 100% del caudal medio (si no existen registros de caudales,

se utiliza el caudal medio de fin de verano) y se considera al menos cuatro valores de caudal.

Este método tiene una sensibilidad ecológica elevada, después de haber verificado una buena correlación entre una cobertura y la biomasa piscícola²⁷. Las variables utilizadas en este método son la cobertura vegetal, los caudales medios anuales, la longitud y el área de la sección.

Método de Washington

El método de Washington fue desarrollado para el Washington Department of Fisheries, (Departamento Pesquero de Washington, EE.UU) por Collings, en 1974, para especies salmonícolas; también es llamado método de las áreas favoritas. Utiliza la cartografía básica de los tramos de los ríos para determinar las áreas de postura y crecimiento de especies consideradas; se aplica para un rango de caudales de interés, considerando criterios biológicos de preferencia para una velocidad y una profundidad del flujo. Estos criterios definen los límites superiores e inferiores de los intervalos de valores seleccionados para las especies. Por lo menos, son considerados tres sitios representativos para desove o crecimiento, siendo definidas cuatro secciones transversales en cada sitio. A lo largo de cada sección transversal y de preferencia –también entre secciones– son realizadas mediciones de velocidad y de profundidad para mínimo cinco valores de caudal. Los valores obtenidos permiten definir isolíneas para la profundidad y velocidad.

Este método constituye igualmente un ejemplo del caudal recomendado con base en criterios de mantenimiento del hábitat²⁸. Una ventaja es la forma de su gráfica²⁹, no siendo necesario correr la simulación hidráulica³⁰. Las variables utilizadas en este método son la velocidad, la profundidad de flujo, el caudal y el ciclo biológico de las especies.

Método de California o Método de Waters

Fue desarrollado por Waters en 1976 para la determinación de caudales mínimos para la postura y crecimiento de especies salmonícolas existentes en los cursos de aguas de California³¹. Este método es semejante al método de Washington y también es conocido con el nombre de las áreas favoritas, en los cuales se elaboran dos mapas planimétricos: uno de velocidad y otro de profundidad del flujo, a partir de información obtenida en secciones transversales

²³. Hynes, 1970.

²⁴. Leathe y Nelson, 1986.

²⁵. Díez, 2005.

²⁶. Wesche y Richard, 1980.

²⁷. *Ibid.*

²⁸. Loar y Sale, 1981.

²⁹. Gordon et al., 1992.

³⁰. Loar y Sale, 1981.

³¹. Wesche y Richard, 1980.

seleccionadas para muestreo (en un número mínimo de 600 mediciones), para los caudales de interés, en un número superior a tres, sin aplicar una simulación hidráulica. Son considerados factores de ponderación, valores entre cero y uno, para cada uno de los parámetros. Adicionalmente, puede ser incluida una caracterización del sustrato en cada sitio del muestreo³². Las variables utilizadas en este método son la velocidad, la profundidad de flujo, el área de la subsección, el sustrato.

Método de Oregón

También es conocido como el método del ancho utilizable LU³³ o del ancho ponderado utilizable LPU³⁴, cuyo fin fue determinar los caudales mínimos y los caudales óptimos para el paso, postura, incubación y crecimiento de especies seleccionadas, siendo aplicados para tramos de ríos salmónícolos del estado Oregón (noroeste de Estados Unidos).

El hábitat disponible y cuantificado como una fracción del ancho del tramo de curso de agua es aplicado para las especies seleccionadas, si se tiene en cuenta criterios de hábitat para la fase del ciclo de vida considerado y para las características físicas del tramo del río³⁵. La relación entre el hábitat y el caudal se obtiene a través de mediciones realizadas en secciones transversales, con las que se definen las zonas de hábitat crítico, para un número mínimo de tres caudales; originalmente no se incluyen en este método modelos de simulación hidráulica³⁶.

Los criterios de hábitat se basan en valores de velocidad y profundidad de flujo donde se verifica la presencia de peces. El ancho utilizable (LU) es definido según un criterio binario: utilizable y no utilizable; para ello se considera un rango de valores de velocidad y profundidad utilizados por la especie, en cada una de las fases del ciclo de vida³⁷. El ancho medio utilizable (LPU) se presenta como criterio para definir la aptitud de hábitat y se considera como un factor de ponderación, que varía entre 0 y 1 para cada variable. Para calcular LPU, cada sección transversal es uniformemente dividida en subsecciones, cada una caracterizada por una profundidad y un ancho y una velocidad media. El ancho de cada subsección es multiplicada por un factor de ponderación para la velocidad y para la profundidad, lo que permite cuantificar en términos relativos el valor de hábitat en cada subsección.

³² *Ibid.*

³³ Thompson, 1972 en Loar y Sale, 1981.

³⁴ Sams y Pearson, 1963 en Wesche y Richard, 1980.

³⁵ Loar y Sale, 1981.

³⁶ Wesche y Richard, 1980.

³⁷ Thompson, 1972 en Loar y Sale, 1981.

La curva de factores de ponderación se puede obtener a través de opinión personal u observaciones experimentales, si se tiene en consideración las preferencias de las poblaciones de especies potencialmente existentes en los cursos de aguas analizadas³⁸.

Metodología IFIM-PHABSIM

La *Instream Flow Incremental Methodology* (IFIM) es considerada por muchos como un avance significativo en la determinación de los caudales ecológicos, ya que sintetiza los aspectos más relevantes de los métodos de Washington y de California³⁹. A partir de ella se analizan conjuntamente variables de tipo hidráulico y biológico.

La metodología IFIM puede ser definida como un conjunto de procesos analíticos y simulaciones elaboradas para prever los cambios en el hábitat de los ríos, debido a las alteraciones del flujo. La forma como se aplique esta metodología podrá ser determinada para cada caso, dependiendo de la especificidad de la situación y así generar varias alternativas, ya que a partir de un caudal inicial se trabaja con diferentes valores de éste al igual que se considera si la especie cuenta con el hábitat físico que requiere, además de trabajar con los datos hidráulicos, hidrológicos y biológicos pertinentes.

El PHABSIM (*Physical Habitat Simulation System* o Sistema de Simulación de Hábitat Físico) es derivado de la metodología IFIM y consiste en realizar simulaciones hidráulicas y de hábitat, lo que permite hacer variaciones en caudal y en la geomorfología del cauce las cuales están relacionadas con el índice de hábitat.

Las variables utilizadas en este método son profundidad y velocidad del flujo, sustrato, cobertura y el ciclo de vida (alevinos, juvenil y adulto) o sus actividades específicas (reproducción, desove, alimentación o reposo), que se reflejan en las curvas de preferencia.

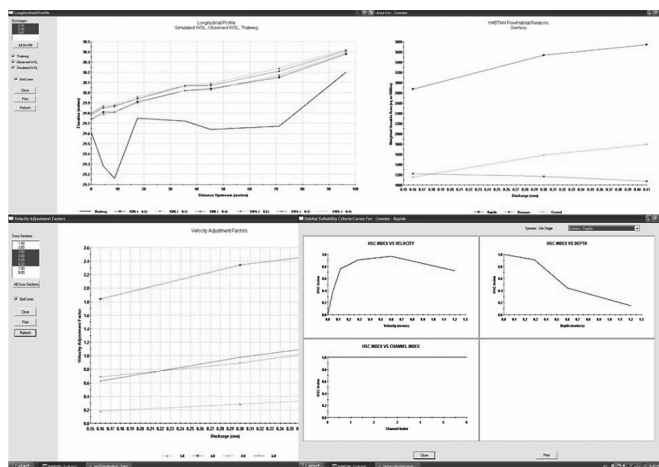
Discusión

El inicio de esta investigación obliga a una consulta de las metodologías existentes y utilizadas en otros países, conocer qué parámetros consideran, sus limitaciones, o sus ventajas y desventajas de unas frente a otras, para que, con base en esas experiencias y conociendo las particularidades de nuestra región, definir, ajustar y, por qué no, agregar lo que se requiera para que sean aplicables a nuestras condiciones. Si se analiza el término *caudales ecológicos* se

³⁸ Loar y Sale, 1981.

³⁹ Reiser et al., 1989b.

podría pensar que no satisface completamente las expectativas que requiere nuestra sociedad, sería más adecuado utilizar el término *caudales ambientales*, término que ya ha sido empleado también por algunos autores (aunque no tan difundido como el primero), pero que permite en el caso particular de Colombia involucrar la incidencia de los componentes sociales y culturales dentro de los regímenes de caudales que se van a determinar.



Gráfica 1. Gráficas de modelación ecohidráulicas en fuentes superficiales de agua. Fuente: Díez, J. Curso Modelación Ecohidráulica en Fuentes Superficiales de Aguas. 2006

Bibliografía

Angelier, Eugène. (2002). *Ecología de las aguas corrientes*. Editorial Acribia, S.A., Zaragoza-España, 217 pp.

Annear, C. T. and Conder, A. L. (1984). "Relative Bias of Several Fisheries Instream Flow Methods". *North American Journal of Fisheries Management* (4), pp. 531-539.

Baker, V. R. (1977). "Stream-Channel Response to Floods, with Examples from Central Texas". *Geological Society of America Bulletin* (88), pp. 1057-1071.

Barlow, M. y Clarke, T. (2004). *Oro azul*. Ediciones Paidós, Ibérica, S.A. Barcelona-España, 417 pp.

Bartschi, D. K. (1976). "A Habitat-Discharge Method of Determining Instream Flows for Aquatic Habitat". Orsborn, J.F., Allman, C.H. (eds). *Symposium on Instream Flow Needs*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, pp. 285-294.

Bovee, K. D. (1982). "A Guide to Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology". *Instream Flow Information Paper* (12), U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-78/33. Fort Collins, Colorado.

Bovee, K. D. (1986). "Development and Evaluation of Habitat Suitability Criteria for Use in the Instream Flow Incremental Methodology". *Instream Flow Paper* (21), Fort Collins, (CO-EEUU).

Brandt, S. A. (2000). "Classification of Geomorphological Effects Downstream of Dams". *Catena*, (40), pp. 325-401.

Código nacional de recursos naturales. (1995). Segunda edición. Compilado y concordado por Miguel Ángel Escallón Ortiz. Ed. Leyer. 385 pp.

Díez, J. (2005). "Bases metodológicas para el establecimiento de caudales ecológicos en el ordenamiento de cuencas". *Revista Ingeniería y Competitividad*, Vol. 7 (2), pp. 11-18.

_____. (2006). *Curso Modelación Ecohidráulica en Fuentes Superficiales de Aguas*. Bogotá.

Friedman, J. M., Osterkamp, W. R., Scott, M. L. and Auble, G. T. (1998). "Downstream Effects of Dams on Channel Geometry and Bottomland Vegetation: Regional Patterns in the Great Plains". *Wetlands* (35), pp. 619-633.

Gordon, N. D, McMahon, T. A., Finlayson, B. L. (1992). *Stream Hydrology. An Introduction for Ecologists*. John Wiley & Sons, Chichester, 526 pp.

Gippel, C. J. and Stewardson, M. J. (1995). *Development of an Environmental Flow Management Strategy for the Thomson River, Victoria, Australia*. Regulated Rivers.

Hill, M. T., Platts, W. S. and Beschta, R. L. (1991). "Ecological and Geomorphological Concepts for Instream and Out-of-Channel Flow Requirements". *Rivers* (2), pp. 198-210.

Instituto Humboldt. (1999). *Biodiversidad. Análisis normativo y de competencia para Colombia*. Editorial Legis, Bogotá, 713 pp.

Jowett, I G. (1997). "Instream Flow Methods: A Comparison of Approaches". *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* (13), pp. 115-127.

Leathe S., Nelson, F. A. (1986). *A Literature Evaluation of Montana's Wetted Perimeter Inflection Point Method for Deriving Instream Flow Recommendations*. Helena, Montana Department of Fish, Wildlife and Parks.

Loar, J. M., Sale, M. J. (1981). "Analysis of Environmental Issues Related to Small-Scale Hydroelectric Development. V. Instream Flow Needs for Fisheries Resources". *Environmental Sciences Division Publication No. 1829 ONRL/TM-7861*. Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy.

Matthews, R. C. Jr, Bao, Y. (1991). "The Texas Method of Preliminary Instream Flow Determination". *Rivers*, Vol. 2 (4), pp. 295-310.

Milhaus, R. T. (1998). "Modelling of Instream Flow Needs: The Link between Sediment and Aquatic Habitat". *Regulated Rivers: Research and Management* (14), pp. 79-94.

Palau A., Alcazar, J. (1996). "The Basic Flow: An Alternative Approach to Calculate Minimum Environmental Instream Flows". Leclerc, M., Capra, H., Valentin, S., Boudreault, A., Côté, Y. (eds). *Ecohydraulics 2000. Proceedings of the 2nd International Symposium on Habitat Hydraulics*. INRS-Eau, Québec, Canada.

Pérez M., Fernando. (2001) *Introducción a la Ingeniería Hidráulica y ambiental*. Editorial Felix Varela, La Habana-Cuba, 217 pp.

Proyecto De Ley N° 365 – Cámara (2005). "Por la cual se establecen medidas para orientar la planificación y administración del recurso hídrico en el territorio nacional".

Reiser, D. W, Ramey, M. P., Wesche, T. A. (1989). "Flushing Flows". Gore, J. A., Petts, G. E. (eds). *Alternatives in Regulated River Management*. CRC Press, Inc., Florida.

Rosgen, D. L. (1996). *Applied River Morphology*. Wildland Hydrology, Pagosa Springs, Colorado.

Tennant, D. (1976). *Instream Flow Requirements for Fish, Wildlife, Recreation, and Environmental Resources*. Proc. Symposium on Instream Flow Needs. Osborne J, Alman C. (Eds). Bethesda (EEUU).

Thompson, A. R. (1992). "Water Allocation for the Environment - the Canadian Experience". Pigram, J. J., Hooper, B. P (eds). *Proceedings of an International Seminar and Workshop on Water Allocation for the Environment*. November 1991. The Centre for Water Policy Research, University of New England. Armidale, Australia. 282 pp.

Wesche T. A, Rechar P. A. (1980). "A Summary of Instream Flow Methods for Fisheries and Related Needs". *Eisenhower Consortium Bulletin* No. 9. Produced by the Water Resources Research Institute, University of Wyoming, for the USDA Forest Service.