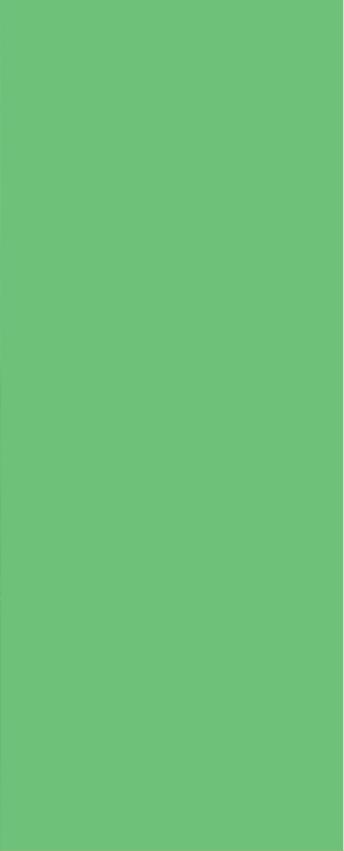


Requerimientos para implementar el caudal ambiental en México



EDITORAS
PERLA ALONSO EGUÍA LIS
MA. ANTONIETA GÓMEZ BALANDRA
PILAR SALDAÑA FABELA



Programa Hidrológico Internacional



Con el apoyo de la Alianza

FUNDACIÓN
GONZALO RÍO ARRONTE, I.A.P.



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

SEMARNAT



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

**REQUERIMIENTOS PARA
IMPLEMENTAR EL CAUDAL
AMBIENTAL EN MÉXICO**

Perla Edith Alonso Eguía Lis, Ma. Antonieta Gómez Balandra
y Pilar Saldaña Fabela
(Editoras)

Requerimientos para implementar el caudal ambiental en México

IMTA-Alianza WWF/FGRA-PHI/UNESCO-
Semarnat

México, 2007

338.927'72
A67

Alonso-EguíaLis, Perla Edith (ed.)
Requerimientos para implementar el caudal ambiental en México / editado por
Perla Edith Alonso-EguíaLis, Ma. Antonieta Gómez Balandra y Pilar Saldaña
Fabela – Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Alianza
World Wildlife Fund/Fundación Gonzalo Río Arronte, Programa Hidrológico
Internacional-Organización de la Naciones Unidas para la Ciencia, la Educación
y la Cultura y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales ©2007.
176 pp. 22.5 x 15.5 cm
ISBN 978-968-5536-96-7

1. Caudal ambiental. 2. México.

Coordinación editorial:
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Jorge Martínez Ruiz
Coordinación de Comunicación,
Participación e Información.

Marco Antonio Sánchez Izquierdo
Subcoordinación de Vinculación, Comercialización
y Servicios Editoriales.

Cuidado de edición:
Antonio Requejo del Blanco.

Diseño de portada:
Óscar Alonso Barrón.

Diagramación:
Luisa Guadalupe Ramírez Martínez.

Fotografía de portada:
Nélida Barajas.

Impresión: Andrés Cruz Rivas.

Primera edición: 2007.

D.R. © Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
62550 Progreso, Jiutepec, Morelos
MÉXICO

ISBN 978-968-5536-96-7

Impreso en México – *Printed in Mexico*

El presente libro se deriva del Foro Nacional para la Determinación del Uso Ambiental o Caudal Ecológico en México, celebrado del 11 al 13 de junio de 2007 en el auditorio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México.

La forma sugerida para citar el libro se indica a continuación:

Alonso-EguíaLis, P. E; Ma. A. Gómez-Balandra y P. Saldaña-Fabela (eds.). 2007. *Requerimientos para implementar el caudal ambiental en México*. IMTA-Alianza WWF/FGRA-PHI/UNESCO-Semarnat. Jiutepec, Morelos. 176 pp.

Directorio

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Polioptro F. Martínez Austria
Director General

Gabriela E. Moeller Chávez
Coordinadora de Tratamiento y Calidad del Agua

María del Pilar Saldaña Fabela
Subcoordinadora de Hidrobiología y Evaluación Ambiental

Perla E. Alonso-EguíaLis
María Antonieta Gómez Balandra
Especialistas en hidráulica

ÍNDICE

PRÓLOGO

Gabriela Moeller Chávez, Ma. Antonieta Gómez Balandra,
Pilar Saldaña Fabela y Perla Alonso-EguíaLis 11

INTRODUCCIÓN A LOS CAUDALES AMBIENTALES

Perla Alonso-EguíaLis y Rebeca González Villela 15

ASPECTOS ECOLÓGICOS DE IMPORTANCIA EN LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL

Perla Alonso-EguíaLis y Patricia Moreno-Casasola 35

ASPECTOS HIDROLÓGICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS: ESTUDIO DE CASO EN CUENCAS CERRADAS

Marcelo Gaviño, Alfonso Gutiérrez y Jesús López de la Cruz 61

FACTORES SOCIALES DE RELEVANCIA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN MÉXICO

Jorge Martínez Ruiz, Daniel Murillo Licea y
Marco A. Sánchez Izquierdo 79

ASPECTOS JURÍDICO RELEVANTES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN MÉXICO

Luis E. Ramos Bustillos, Gustavo A. Ortiz y Alejandra Serrano Pavón 95

ANÁLISIS ECONÓMICO SOBRE LA DETERMINACIÓN E INSTRUMENTACIÓN DEL CONCEPTO DE CAUDAL ECOLÓGICO EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Eduardo Donath de la Peña y Enrique Sanjurjo Rivera 115

ON ASPECTS OF A LARGE SCALE REHABILITATION PROGRAM FOR AN OVER-ALLOCATED AUSTRALIAN RIVER: THE LIVING MURRAY

Lindsay J. White 145

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL O ECOLÓGICO
EN MÉXICO**

Pilar Saldaña-Fabela., María Antonieta Gómez-Balandra
y Perla Edith Alonso-EguíaLis

PRÓLOGO

La implementación de los caudales ambientales a nivel internacional ha incorporado cada vez con mayor detalle la participación de distintas disciplinas para transitar del enfoque hidrológico–hidráulico y de regulación, a un enfoque holístico, que incluye los requerimientos ambientales de los ecosistemas acuáticos y su interdependencia y conectividad. Este enfoque reconoce, además, a todos los usuarios y actores e incorpora las negociaciones para reducir los impactos de las actividades humanas y propiciar la conservación de los ecosistemas.

Por ello, en la literatura y legislaciones se han utilizado distintos términos como flujo, uso, gasto y caudal, así como los adjetivos ecológico y ambiental. Actualmente, se asume que “caudal ambiental” refleja las condiciones naturales de las corrientes e integra las distintas disciplinas para su implementación. En este libro, se utilizan los diversos términos y, en algunos capítulos, los autores señalan las diferencias y consideraciones pertinentes a sus campos de aplicación.

Con el incremento dramático en la regulación y agotamiento de las corrientes por la infraestructura hidráulica y por la sobreconcesión de volúmenes, la implementación de caudales ambientales ha pasado de ser, además de una herramienta de planeación para grandes obras hidráulicas, como las derivaciones y presas para distintos usos o multipropósitos, un instrumento de negociación dentro de un marco de la gestión integrada de los recursos hídricos, a nivel de cuenca, subcuenca, microcuenca e, incluso, segmentos de ríos, donde se establecen concertadamente los objetivos ambientales y las metas para alcanzarlos.

Dentro del marco normativo internacional y en diversos países, el reconocimiento del ambiente como usuario prioritario, ha llevado a señalar la importancia de conservar o asignar caudales a los distintos ecosistemas acuáticos a través de declaraciones ministeriales, agendas y acuerdos internacionales. Algunos países han revisado, incluso, la prelación del uso del agua en sus leyes nacionales de aguas y trasladado al uso ambiental como uno de los más fundamentales, únicamente después del abastecimiento humano.

Dicha importancia también ha sido una respuesta al reconocimiento de los servicios ambientales que proveen los ecosistemas acuáticos, como son: la

producción de agua limpia y de alimento, biodiversidad, dilución y asimilación de contaminantes, recreación, paisaje e incremento de la plusvalía inmobiliaria, entre los más importantes.

La evolución de la ciencia de la determinación de los caudales ambientales ha pasado del enfoque de manejar caudales mínimos, al reconocimiento de los componentes que determinan su magnitud, duración, temporalidad, frecuencia y tasa de cambio a través del tiempo. Asimismo, se han incorporado los requerimientos de flujo para la reproducción, alimentación y migración de especies de distintas comunidades acuáticas, principalmente peces y macroinvertebrados bentónicos.

Por otro lado, la implementación del caudal ambiental se ha filtrado al marco regulatorio y normativo de los recursos hídricos, y también ha encontrado una expresión de su impacto o importancia económica tangible e intangible.

Del 11 al 13 de junio del 2007 se llevó a cabo en el IMTA, el Foro Nacional sobre la Determinación del Uso Ambiental del Agua o Caudal Ecológico en México, en cumplimiento de sus compromisos institucionales y cobijado bajo el tema "Ecohidrología" del Programa Hidrológico Internacional (PHI) y con el apoyo de la alianza World Wildlife Found (WWF) - Fundación Gonzalo Río Arronte. Se contó con la participación de cuarenta instituciones y ciento diez participantes (anexo 1 y 2 del capítulo 8) nacionales e internacionales de sectores gubernamental, universidades, centros de investigación y asociaciones civiles. El resumen videográfico del evento quedó archivado en un DVD con duración de 120 minutos.

Este foro tuvo como objetivos: a) dar a conocer las experiencias y metodologías hasta ahora desarrolladas en el mundo y en México; b) identificar entre la comunidad académica y expertos en el tema, criterios básicos y recomendaciones para la determinación e implementación del concepto de caudal ambiental en cuencas hidrográficas y acuíferos; c) evaluar, aportar y homogeneizar la información aplicable al uso ambiental del agua con un enfoque integral, multidisciplinario e interdisciplinario, tomando en cuenta aspectos ecológicos, hidrológicos, jurídicos, sociales y económicos; y d) discutir criterios para garantizar la conservación y restauración de los ecosistemas acuáticos del país.

La dinámica de trabajo se enfocó, como primer punto, a la exposición de conferencias magistrales impartidas por expertos internacionales de Australia, Estados Unidos de América y Argentina, seguidas de reuniones de trabajo o mesas de discusión por disciplina involucradas en la implementación de caudal ambiental, como son la hidrología, hidráulica, ecología, sociología, aspectos jurídicos y económicos.

En este libro se presenta una revisión temática sobre caudales ambientales como marco de referencia, que intenta ser una revisión bibliográfica amplia, aunque no exhaustiva, por la gran cantidad de información bibliográfica científica, técnica y aplicada actualmente disponible.

Como resultado del Foro, los coordinadores de las sesiones han realizado un importante trabajo de revisión de los temas, de análisis y de síntesis de las principales conclusiones de cada uno de los aspectos tratados.

Adicionalmente a estos materiales, también se cuenta con un disco compacto del Foro donde se presentan resúmenes de las ponencias magistrales con invitados de instituciones como The Murray Darling Basin Comisión de Australia, The Nature Conservancy (TNC) de Estados Unidos de América, The International Water Management Institute de Sri Lanka y del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO, a quienes también se extiende un amplio agradecimiento.

Las experiencias en la determinación e implementación de los caudales ambientales en México son limitadas. Aunque el interés en el tema se inició y ha persistido por más de una década, todavía son muy escasas las publicaciones y los estudio de caso. Actualmente existe un fuerte interés del sector medio ambiente y de la Comisión Nacional del Agua para determinar e implementar estos caudales, estableciendo las regulaciones, lineamientos y metodologías, al mismo tiempo que la academia promueve su participación en estudios específicos que contribuyan a la conservación de los ecosistemas.

Las organizaciones no gubernamentales nacionales e internacionales como WWF, TNC, IRF (Internacional River Foundation) y el Banco Mundial, están jugando un papel muy importante, tanto implementando metodologías holísticas, como promoviendo actividades de fortalecimiento institucional (*capacity building*) para distintos actores. Además, han lanzado la Declaratoria de Brisbane en el X Simposio Internacional de Ríos y Conferencia de Caudales Ambientales, específica para promover la implementación de los caudales ambientales, en la que hacen un llamado urgente a todos los sectores de la sociedad para preservar los ecosistemas acuáticos, sus recursos y servicios ambientales (septiembre 2007, ver anexo 3, capítulo 8).

Por su parte y con respecto al tema, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua lo ha incorporado a sus programas académicos y ha participado en la revisión de la norma específica y normas relacionadas; asimismo, fortalece sus cuadros de investigadores en la especialidad, presenta experiencias en foros nacionales

e internacionales, adapta y aplica metodologías, y abre espacios para la práctica de la implementación de los caudales ambientales en México.

Ahora, como aportación en la materia, edita el presente libro.

Gabriela Moeller Chávez
María Antonieta Gómez Balandra
Pilar Saldaña Fabela
Perla Alonso-EguíaLis

INTRODUCCIÓN A LOS CAUDALES AMBIENTALES

Perla Alonso-EguíaLis y Rebeca González Villela

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso Jiutepec, Morelos, México; palonso@tlaloc.imta.mx, rebeca_gonzalez@tlaloc.imta.mx

Resumen

En el presente capítulo se analiza la importancia de la implementación de los caudales ambientales desde un punto de vista ecosistémico o de manejo integral. Se presentan las diferentes definiciones de caudales ambientales que se encuentran en la literatura, así como de algunas de las metodologías hasta ahora conocidas a nivel global, (hidrológicas, hidráulicas, de simulación de hábitat y holísticas), haciendo mención a los casos donde han sido aplicadas para México, Centro, Sudamérica, USA, África, Australia y España. Se establecen criterios para la selección de una metodología de caudales donde las variables a considerar abarcan diferentes tipos de manejo, objetivos ambientales, intenciones de conservación, entorno socioeconómico, personal capacitado y tiempo disponible. Los métodos holísticos son los más recomendados por reconocer la variabilidad natural como clave de la conservación, y porque incluye una aproximación hidrológica, ecológica, y socioeconómica. El cálculo del caudal ambiental es un tópico multidisciplinario que requiere con urgencia se contemple en los planes de desarrollo y gestión del recurso agua, y se siente sobre bases legales sólidas.

Abstract

This chapter analyzes the importance of the implementation of environmental flows from an ecosystemic or integrated management perspective. The different definitions for environmental flow found in the literature are presented, as are some of the methodologies (hydrological, hydraulic, habitat-simulation, and holistic) known up to now at a global scale, with a special mention of those that have been applied in Mexico, Central and South America, The United States, Africa, Australia, and Spain. Criteria are established for selecting an environmental flow methodology where the variables to be considered cover different types of management, environmental objectives, conservation intentions, socioeconomic conditions, trained personnel, and available time. Holistic methods are the most recommendable, since they recognize natural variability as a key to conservation, and because they include a hydrological, ecological, and socioeconomic approach. Environmental flow is a multidisciplinary task that needs to be included urgently in water development and management plans backed by a sound legal framework.

Introducción

El incremento desproporcionado en la demanda de agua para cubrir las crecientes necesidades humanas ha resultado en una problemática muy

compleja entre el uso y explotación de ríos, y su conservación como sistema ecológicamente estable e importante prestador de innumerables servicios ambientales. Técnicamente, implica un reto y enfrenta grandes dificultades desde el punto de vista social, económico y político.

El manejo del agua se ha dirigido tradicionalmente a satisfacer las necesidades de consumo, riego, industrias y generación de electricidad. A partir de la publicación del *Reporte Brundtlat* o *Nuestro Futuro Común* (WCED, 1987), de *Cuidados para la Tierra* (IUCN *et al.*, 1991) en 1992 y la Conferencia de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, se observó un cambio en la forma de concebir el recurso agua y permitió se interrelacionaran dos conceptos: el primero, “desarrollo sustentable”, el cual se ha definido como “aquel que cubre las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras”; y el segundo, “la vida de la gente y el medio ambiente están profundamente interrelacionados”. Esto permite introducir una alternativa más a la definición de desarrollo sustentable; el de incrementar la calidad de vida del ser humano dentro de la capacidad de soporte del ecosistema. Bajo los principios de desarrollo de la Conferencia del Agua, en Mar del Plata, Argentina (Naciones Unidas, 1997) y de Dublín, Irlanda (WMO, 1992), Capítulo 18 de la agenda 21, se desarrolla el concepto “manejo integral del agua” (IWRM), que la reconoce como una parte integral del ecosistema, un recurso natural, y un bien social y económico, cuya cantidad y calidad determinan la naturaleza de su utilización (Naciones Unidas, 1992). Una parte central de este concepto, es la protección del recurso considerando: agua superficial y subterránea, calidad del agua, ecosistemas acuáticos, y manejo de la tierra y el agua englobados bajo una visión integrada.

De tal forma, se ha venido generalizando la necesidad de manejar el agua, los procesos relacionados con ella y la biodiversidad, de una manera sustentable. Sin embargo, en la práctica, el valor de los ecosistemas es raramente considerado (Berkamp, *et al.*, 2000).

Los caudales en los ríos de todo el mundo se modifican a través de la construcción de presas, embalses y sustracciones para el suministro agrícola y urbano; para mantener los flujos apropiados para la navegación y por la construcción de estructuras de control. Estas intervenciones han generado impactos significativos reduciendo, en general, los caudales totales de muchos ríos, afectando su estacionalidad, magnitud y periodicidad (Raven *et al.*, 2000; Fischer y Kummer, 2000; TNC, 2006). La alteración en la cantidad y calidad del agua no sólo se observa en la salud de los ecosistemas acuáticos y sus componentes, sino que se refleja directamente en las actividades económicas que dependen de este ecosistema, como son la pesca en ríos y estuarios, navegación, llanuras de inundación y su vegetación natural, mantenimiento de acuíferos y presencia

de humedales, estos últimos importantes como retenedores de suelo y contaminantes.

Se considera que en el mundo existen aproximadamente cincuenta mil grandes presas (cortinas con altura mayor de 15 metros), lo que implica que alrededor del 60% de los ríos del planeta se encuentran alterados de manera importante (Revenge *et al.*, 2000), y que dos terceras partes del agua que debería llegar a los océanos hoy se encuentra represada (Naiman *et al.*, 1993).

Se estima que México cuenta con alrededor de ocho mil presas y diques, 667 de los cuales se hallan clasificados entre las grandes presas, lo que ubica al país en segundo lugar, después de Brasil, en poseer el mayor número de presas en Latinoamérica y, en doceavo, en el mundo (ICOLD, 2000).

El caudal ambiental es una alternativa que busca encontrar un equilibrio entre las necesidades del ambiente y las humanas, reconociendo que para conservar la diversidad y los bienes y servicios ambientales que brindan los sistemas acuáticos, se debe siempre considerar que la variabilidad de los caudales naturales son los que mantienen la salud y resiliencia de los sistemas naturales acuáticos. Por ello, las propuestas más modernas de cálculo de caudal ambiental buscan acercarse lo más posible a esta variabilidad.

Las mediciones de la respuesta ecológica a las modificaciones de los componentes del flujo o caudal natural deben ser las bases científicas que orienten y monitoreen las propuestas de un caudal ambiental, pero sin soslayar jamás la importancia que tiene este recurso para la salud y bienestar humano, así como para el desarrollo económico de las naciones.

La aplicación de estos mecanismos para “equilibrar” el manejo del recurso agua requiere de compromisos, pero se debe tener en mente que la meta final será encontrar un punto intermedio que proteja a cada ecosistema y sus servicios ambientales, al mismo tiempo que se cubran las necesidades humanas.

Términos y definiciones de caudales ambientales

Los caudales o flujos ambientales pueden ser definidos como aquella provisión de agua necesaria para mantener la integridad, productividad, servicios y beneficios de los ecosistemas acuáticos, particularmente cuando se encuentra sujeta a regulación del caudal y alta competencia debido a la existencia de múltiples usuarios (Bunn y Arthington, 2002; King *et al.*, 2003; Tharme, 2003). Los procesos que se utilizan para determinar estos flujos ambientales se conocen como “evaluaciones o requerimientos de caudales ambientales” (Brown y King, 2003).

En la abundante literatura con que actualmente se cuenta para este tema, se encuentran términos sinónimos de caudales ambientales, tales como: "caudales de compensación", "caudales ambientales", "caudales de mantenimiento", "caudales mínimos" y "caudales de reserva" que generan una alta indefinición, sobre todo cuando se trata de aplicar a trabajos multidisciplinarios. García de Jalón y González del Tánago (2006) sugieren el término "caudal ecológico" por tener connotaciones claras, tanto para el público general como para los técnicos, políticos y gestores del agua.

Los caudales ecológicos se definen como el agua que se deja correr en un ecosistema fluvial o el caudal que se libera dentro de él, con el propósito específico de manejar la condición del ecosistema. La falla en el manejo de los caudales ha conducido al deterioro en la estructura y función (salud) de muchos ríos del mundo (Dyson *et al.*, 2003; Tharme, 2003; Arthington *et al.*, 2006).

Gaviño (2007), por su parte, señala que se encuentra con frecuencia en la bibliografía el nombre de caudales ecológicos y caudales ambientales, y considera que en la cuantificación del caudal ecológico se busca un umbral que fije los valores por encima de los cuales la especie sensible se recupera de las perturbaciones ocasionadas por la falta de escorrentía, es decir, que los cambios originados en ella dejan de ser irreversibles y, más bien, dependen de la duración de los mismos y de la resiliencia ecológica de la especie. Por otra parte, define caudal ambiental como aquel que es determinado por encima del establecido por el caudal ecológico, y que fija un umbral mínimo y/o máximo destinado a la satisfacción de las necesidades establecidas de manera *ad-hoc* por la sociedad.

Richter *et al.* (1996), Poff *et al.* (1977) y Lytle y Poff (2004) reconocen que el establecimiento arbitrario de un caudal mínimo es inadecuado, ya que la estructura y la función de un ecosistema riverino y adaptaciones de la su biota son generadas por patrones de variación temporal en los caudales fluviales (el paradigma de régimen de caudales naturales). Actualmente, la comunidad de ecólogos reconoce que para proteger la biodiversidad de los ecosistemas fluviales y mantener las condiciones esenciales de salud y servicios que proveen los ríos, se requiere imitar la variabilidad natural de los componentes esenciales de caudales, considerando la magnitud, frecuencia, periodicidad, duración y grado de cambio de los eventos de flujo en los ríos (Fischer y Kummer, 2000; King *et al.*, 2003; Tharme, 2003; Arthington *et al.*, 2006; King y Brown, 2006). Asimismo, se reconocen los efectos ecológicos incontrovertibles, con sus implicaciones socioeconómicas por la alteración hidrológica de los ecosistemas fluviales a escalas globales relevantes, con impactos en el aislamiento genético a través de la fragmentación de los hábitats, en el decremento de la biodiversidad y en el abatimiento de las pesquerías (Richter *et al.*, 1997; Rosenberg *et al.*, 2000; Tharme, 2003).

En la legislación Española de 2007 se señala a los caudales ecológicos como aquellos que permiten mantener de forma sostenible la funcionalidad y estructura de los ecosistemas acuáticos y de los ecosistemas terrestres asociados, contribuyendo a alcanzar el buen estado o potencial ecológico en ríos o aguas de transición. El objetivo del manejo de los caudales es la recuperación o conservación de determinados aspectos del régimen natural de caudales, encargados de mantener unas condiciones del hábitat adecuadas y generar los procesos ecológicos, hidrológicos y geomorfológicos necesarios para mantener a largo plazo las comunidades biológicas en un estado de conservación previamente definido.

En la declaración de Brisbane, Australia durante el 10th International Riversymposium and International Environmental Flows Conference, celebrada en septiembre de 2007 y en la que asistieron más de 750 científicos, economistas, ingenieros, gestores del agua y políticos de más de 50 países, acordaron señalar que los caudales ambientales deben de proveer de los caudales necesarios para sostener a los ecosistemas de agua dulce y los ecosistemas costeros en coexistencia con la agricultura, la industria y las ciudades. El objetivo del manejo de los caudales ambientales consiste en restaurar y mantener la integridad del ecosistema, los bienes y servicios y la resiliencia de los mismos, puntos que deberán ser evaluados socialmente a través de la participación de equipos bien informados y científicamente sustentados.¹

Metodologías para el cálculo del caudal ambiental

De acuerdo con Stalnaker (1982) y Trihey y Stalnaker (1985), los primeros indicios de evaluaciones de caudal ambiental surgen en la década de los años cuarenta, en los Estados Unidos de América. Pero no fue sino hasta la década de los años setenta, cuando se inicia un importante trabajo resultado de las modificaciones en la legislación estadounidense en cuanto al uso del agua y el inicio de la era de la construcción de las grandes presas (WCD, 2000). Fuera de Estados Unidos de América, y de algunos países de Europa (España, Francia y Suiza), la historia de la evaluación de caudal ambiental es escasa, y no es sino hasta mediados de los años ochenta que se registra el uso de estas metodologías para países como Inglaterra, Australia y Nueva Zelanda, mientras que países en desarrollo, como son los de Centro y Sudamérica, la historia del uso de dichas metodologías está apenas en sus inicios (Tharme 2003; Córdoba e Iza, 2007).

De acuerdo con Tharme (2003), se han desarrollado alrededor de 207 distintas metodologías enfocadas al cálculo del caudal ambiental, aplicadas en 44 países. Estas van desde el uso simple de registros hidrológicos que establecen

un mínimo de caudal constante, como propuesta de requerimiento de caudal ambiental, o desde cálculos simples de especificaciones de cierta profundidad que permita un cierto perímetro húmedo en el flujo con la finalidad de asegurar la permanencia de alguna especie de interés económico, hasta las complejas y sofisticadas que relacionan los cambios en las descargas con respuestas en la morfología y ecología del cauce, a partir del análisis de un sistema completamente modificado de su estado natural, y que busca dar opciones para mantener un sistema fluvial completo y sus sistemas de humedales asociados.

Toda esta gama de metodologías puede agruparse, de manera general, en seis categorías: hidrológicas, hidráulicas, de simulación de hábitat, holísticas, de técnicas multivariadas y aquellas que, debido a su disparidad en formas de cálculo, son clasificadas como "otras".

De acuerdo con Brown y King (2003), las evaluaciones de caudal ambiental pueden ser de dos clases:

a) prescriptivas: usualmente dirigidas a objetivos específicos que resultan en recomendaciones de valores de flujo o régimen de caudales para componentes particulares del ecosistema. No consideran la negociación porque el cálculo está orientado a justificar un valor simple y, por otra parte, no cuentan con información suficiente sobre las implicaciones de los resultados, por no considerar otras visiones.

b) Interactivas: se enfocan en las relaciones entre los cambios provocados en el caudal del río, considerando más de un aspecto de éste. Una vez que dichas relaciones se establecen, la recomendación no se restringe entonces a un simple valor, sino que establece diversos valores y se contemplan sus posibles escenarios, por lo que son susceptibles de establecer negociaciones.

Métodos hidrológicos

Son los más simples por ser calculados a partir de datos llamados "de escritorio". Referidos también como metodologías de porcentaje fijo (Cavendish y Duncan, 1986; Milhous *et. al.*, 1989), su objetivo original fue la conservación de especies de importancia económica, como el salmón, y en ríos de tipo permanente con variación hidrológica estacional escasa. Estos métodos son los más conocidos y empleados hasta hoy, y representan el 30% del total de las metodologías hasta ahora desarrolladas, con un total de 61 métodos o técnicas. El más conocido es el método Tennant o Método de Montana, desarrollado por Tennant (1976) y por la US Fish and Wildlife Service (USFWS). Difiere del resto de las metodologías hidrológicas porque utiliza colección de datos de

campo para obtener información de hábitats, hidráulicos y biológicos. También considera diferentes porcentajes del promedio anual del caudal para distintas condiciones o categorías de ríos, así como su estacionalidad. Las categorías recomendadas para caudal son cuatro y van, desde el 10% del promedio medio anual, denominada "condición mínima o pobre," hasta 60-100% como "rango óptimo". A la fecha, se cuenta con una serie de trabajos que han hecho modificaciones de importancia al método original bajo criterios hidrológicos, geomorfológicos y ecológicos, o consideraciones a nivel de cuenca (Dunbar *et al.*, 1998), que han introducido, como parte importante del análisis, el "rango de variabilidad natural" (Richter *et al.*, 1996, 1997); sin embargo, no incluyen las mediciones de la respuesta ecológica del sistema. En México, se ha aplicado el método Tennant para establecer caudales recomendados en evaluaciones de impacto ambiental de presas (Gómez-Balandra *et al.*, 2007). También se ha efectuado una modificación al método de Tennant para las zonas tropicales de México en donde se considera la variación climatológica trimestral anual para tratar de reproducir las variaciones de caudal natural durante el año (García *et al.* 1999). Otros índices comúnmente utilizados son los llamados percentiles de excedencia, derivados de los análisis de las curvas de duración de flujo, los cuales relacionan las descargas y el porcentaje del tiempo, e incluyen el Q_{95} , Q_{90} , $7Q_{10}$ y Q_{364} .

Métodos hidráulicos

A partir de las metodologías básicas hidrológicas posteriormente se desarrollaron metodologías que emplean relaciones cuantificables entre cantidad y calidad del recurso, tales como el hábitat y la descarga para el cálculo de los requerimientos del caudal ambiental, por ejemplo Stalnaker y Arnette (1976), quienes consideraron, por vez primera, efectos específicos de incremento de la descarga sobre el hábitat y características biológicas de requerimientos ambientales, como son áreas de reproducción y crecimiento para algunas especies de importancia económica (Tharme, 1996). Se incluyen alrededor de 23 metodologías que se traducen en el 11% del total de metodologías conocidas y se aplican en veinte países (Tharme, 2003).

Loar *et al.* (1986) son los primeros en utilizar el término "metodologías de estimación hidráulica" (conocido también como "retención de hábitat"), para establecer la relación entre ciertas variables hidráulicas, como perímetro húmedo o profundidad máxima (método de perímetro húmedo), usualmente medidas en una sola sección transversal del río (normalmente en zona de rápidos), asumiendo que la protección de tales áreas asegurará una protección adecuada a todo el sistema. De acuerdo con Tharme (1996) y Dunbar *et al.* (1998), estas metodologías son las precursoras de las llamadas "metodologías de simulación de hábitat".

Métodos de simulación de hábitat

También conocidas como “metodologías de modelación de hábitat”, representan el 28% del total de metodologías conocidas y se emplean en 58 países, siendo la más común la llamada “*Instream Flow Incremental Methodology*” (IFIM), basando gran parte de sus resultados en un modelo de simulación de hábitat llamado “*Physical Habitat Simulation System*” (PHABSIM).

Hacen un análisis detallado de la cantidad y disponibilidad de hábitats físicos dentro del río para especies objetivo, o bien, comunidades de especies bajo escenarios de diferentes descargas, con base en respuestas establecidas en variables hidrológicas, hidráulicas y biológicas.

Los cambios observados con relación a la variación de caudal-hábitats físicos son modelados en diversos programas hidráulicos usando datos tales como profundidad, velocidad, composición y cobertura de sustrato, colectados desde varias secciones transversales del río en estudio. Las condiciones así simuladas se relacionan con las preferencias o requerimientos de hábitats para diferentes estadios de vida de peces, actividades de alimentación o reproducción, calculados a partir de las llamadas “curvas de preferencia de hábitat” (basadas en respuestas de ausencia-presencia o abundancia) y, con ello, se obtiene una serie de flujos óptimos como requerimientos de flujo ambiental.

Esta metodología ha sido la más ampliamente utilizada en Estados Unidos de América, ya que de manera rutinaria la utiliza la US FISH and Wildlife Service (Armour y Taylor, 1991), reportándose una cantidad enorme de casos de aplicación (Stalnaker, 1998). A esto se añade que es una de las dos metodologías que cuenta con manual de uso (Milhous *e. al.*, 1989) y un programa de cómputo muy bien desarrollado y compatible con ambiente *Windows* (USGS, 2000), así como con cursos de capacitación para su utilización. En México, la metodología ha sido evaluada por la Comisión Nacional del Agua y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua para cálculo del caudal ecológico en el río Santiago, Nayarit (García *et al.*, 1999), y con el apoyo de la aplicación de métodos multivariados se efectuaron análisis comparativos del método de Tennant modificado y la simulación del hábitat aplicados al río Santiago por González-Villela y Banderas (2007).

Métodos holísticos

Tharme (1996) introduce el término “métodos holísticos” que, posteriormente, es utilizado ampliamente en trabajos como los de Stewardson y Gippel (1997) y King *et al.*, (1999). Representa apenas el 7.7% del global total con 16 metodologías aplicadas hasta ahora en Sudáfrica, Australia, Reino Unido y, recientemente, en Costa Rica (Rodríguez, 2007). Estas metodologías surgen basadas en el

estudio y comprensión de la complejidad ecológica de los sistemas acuáticos epicontinentales (Ward y Stanford, 1987; Petts, 1989; Hill *et al.*, 1991; Poff *et al.*, 1997).

A diferencia de las anteriores, consideran como principio la observación del sistema fluvial completo y toman gran auge en Sudáfrica y Australia en donde, a diferencia de Estados Unidos de América, se le da poca importancia a la actividad de la pesca en cuerpos de agua dulce, por lo que se pone énfasis en la protección del sistema fluvial completo y su, aún entonces, poco conocida biota.

Las metodologías holísticas se enfocan, principalmente, en reconocer los eventos hidrológicos importantes o críticos del patrón de flujo que definen la variabilidad natural y que dan dirección a los principales atributos del ecosistema acuático, por lo que requieren, para ello, considerable información de tipo multidisciplinaria.

La base es la construcción sistemática de un régimen de caudales (estimado como modificado, desde el principio), considerando todos los elementos informativos hidrológicos de frecuencia mensual que representa una característica bien definida del régimen de caudal y que busca alcanzar un objetivo ecológico, geomorfológico, de calidad de agua, social u otro, a partir de dicho régimen modificado (King y Tharme, 1994; Arthington, 1998; Arthington y Lloyd, 1998; Arthington *et al.*, 2000). De tal manera que estas metodologías deben interpretarse más como una filosofía, un “modo de entender el problema”, que como una secuencia rígida y estandarizada de procedimientos (Fernández-Yuste *et al.*, 2006).

Las metodologías holísticas más avanzadas utilizan rutinariamente varias de las herramientas de análisis hidrológico, hidráulico y de hábitat físico de las metodologías anteriores, dentro de un marco modular, para establecer los requerimientos del caudal ambiental del ecosistema fluvial (Tharme, 2000).

La metodología llamada “*Building Block Methodology*” (BBM) es la más conocida de este grupo y la aplicada con más frecuencia, además de ser la segunda, después de la IFIM, en contar con un manual de aplicación (King *et al.*, 2000). BBM ha evolucionado en corto tiempo para dar surgimiento al *Downstream Response to Imposed Flow Transformation* (DRIFT), cuyo objetivo es incorporar a los análisis las componentes sociales y económicas generadas a partir de escenarios de requerimientos de caudales propuestos, y de los efectos que estos provocan sobre un escenario biofísico (King y Brown, 2006). Adicionalmente, la relación entre las consecuencias sociales para los usuarios se evalúa en paralelo con las consecuencias ecológicas y geomorfológicas, así como con

las implicaciones económicas, en términos de mitigación y compensación. La metodología ha sido aplicada en varios ríos de Zimbabue (Steward, 2002) y en el río Tuel, Argentina (Gaviño, 2007). Actualmente, esta metodología es aplicada en el río Conchos, Chihuahua (Barrios *et al.*, 2007).

La Organización de Estudios Tropicales (OET) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) han sido las instituciones pioneras en Sudamérica en el tema de caudal ambiental. Ambas realizan investigación que abordan la ausencia de metodología para condiciones del trópico, donde la biodiversidad es abundante y los usos del agua empiezan a tener alta competencia y a generar conflictos. Actualmente, el ICE ha desarrollado un programa de cálculo de caudal ambiental para lo que ellos llaman “la determinación de un caudal mínimo aceptable” (CMA), incorporando información en un programa de cómputo llamado “RANA”, diseñado específicamente para ser utilizado en el cálculo del caudal ambiental (Rodríguez, 2007). El tipo de información con el que se alimenta este programa es: caudal mínimo natural a través de datos hidrológicos y meteorológicos históricos y actuales; datos de indicadores biológicos del mantenimiento de la biodiversidad (sustentabilidad ecológica), identificación de las especies más sensitivas y sus requerimientos, datos socioeconómicos y demandas de uso de agua, además de la elaboración de un modelo hidráulico.

La OET concluye en su investigación, que el grado de “salud ambiental” en ecosistemas acuáticos es una decisión de la sociedad, así como la asignación de agua a diferentes usos, pues debe ser una decisión con participación de los actores de la cuenca y que la asignación del agua debe partir de un plan de manejo integral (Jiménez, 2005).

Criterios para la Selección de un método de cálculo de caudal ambiental

Entre los criterios para selección de un método, enfoque o marco específico, está la clase de problema a tratar (extracción, presa, control entre otros), competencia técnica, tiempo y dinero disponibles, así como el marco legislativo dentro del cual deben establecerse los caudales (Dyson *et al.*, 2003).

Se requiere de los enfoques integrales que utilizan equipos de expertos e incorporan la participación de las partes involucradas, donde los aspectos científicos son un factor a considerar. Los métodos integrales tienen la ventaja de abarcar la totalidad del sistema hidrológico-ecológico-partes interesadas, la desventaja es el costo que implica el recopilar los datos relevantes.

La evaluación del caudal ambiental es un tema especializado y, por ello, debe por necesidad involucrar a expertos. El enfoque de equipo reconoce que la

evaluación del caudal ambiental es un asunto multidisciplinario, que requiere insumos de una amplia gama de áreas especializadas (Dyson *et al.*, 2003; Richter *et al.*, 2006).

La evaluación de caudal ambiental implica evaluar el impacto y la mitigación de modificaciones específicas de caudal, tales como presas o extracciones importantes. Cuando hay un solo sitio que reciba impacto, se necesita de un modelo detallado y es más probable que la autoridad reguladora esté dispuesta a financiar los elevados costos. Este será, sobre todo, el caso donde la asignación de agua resulte sumamente contenciosa y requiera una investigación pública (Richter *et al.*, 2006).

Considerando que en el sentido más estricto, restaurar es “restablecer la estructura y función de un ecosistema” a su estado más o menos natural, en la práctica, no resulta posible una restauración completa, debido a la necesidad de hacer extracciones importantes, a la presencia de presas o desarrollos en las llanuras inundables. Como consecuencia, a menudo se utiliza la restauración en el sentido de regresar al río o tramo de río, a un estado previo reciente de mejor calidad (Bunn y Arthington, 2002).

Tomar en cuenta que en la aplicación de cualquier tipo de metodología para la determinación del caudal ambiental, el contar con un programa nacional de recopilación de datos que incluya mediciones de hidrología (caudales fluviales), hidráulicas (nivel de agua y sección transversal de ríos) y ecología (especies presentes, ubicación encontrada y relaciones con el caudal) en una amplia gama de sitios, es de gran ayuda de tal manera que se abarquen en forma representativa los diferentes ecosistemas y la situación nacional (Dyson *et al.*, 2003).

En la actualidad, cada vez más métodos adoptan un enfoque integral que incluye de manera explícita todo el ecosistema, tales como humedales conexos, aguas subterráneas y estuarios (Arthington *et al.*, 2006; King y Brown, 2006; Richter *et al.*, 2006).

Gestión y caudal ambiental

Mundialmente se reconoce que para alcanzar la implementación del caudal ambiental, es necesaria una vía legal y administrativa clara para proteger el caudal fluvial antes de que las partes interesadas estén dispuestas a comprometerse, y de que las agencias se hallen listas para financiar estos proyectos. No se producirá ningún intento serio de gestionar caudales ambientales, a no ser que se tomen decisiones políticas claras en la esfera apropiada de gobierno (Declaratoria de Brisbane, 2007).

Para lograr el impulso necesario en la determinación de un régimen de caudales ambientales se deberán involucrar muchos actores diferentes. Bajo estas condiciones, una estrategia exitosa implicará trabajar con la mayor cantidad posible de grupos interesados y adaptar tácticas a lo largo de las negociaciones (King *et al.*, 2003).

Para el análisis de los caudales ambientales se requiere de la integración de una serie de disciplinas, incluyendo la ingeniería, el derecho, la ecología, la economía, la hidrología, las ciencias políticas, la sociología y la comunicación, con el objetivo de generar un mejor régimen de gestión que garantice la cantidad, calidad y regularidad, para sustentar la integridad de los ríos y de otros ecosistemas acuáticos y, en consecuencia, lograr el equilibrio óptimo entre los diferentes usos (Tharme, 2003).

Dado el incremento de recursos hídricos en todo el mundo y el deterioro consiguiente de ecosistemas y de sus servicios, los caudales ambientales no son un lujo, sino una parte esencial de la gestión hídrica moderna que merece se aplique ampliamente (Richter *et al.*, 2006).

En el caso más extremo, la ausencia a largo plazo de caudales pone en riesgo la existencia misma de ecosistemas dependientes y, por tanto, las vidas, los medios de subsistencia y la seguridad de comunidades e industrias río abajo (Brown y King, 2003).

Es importante mencionar que la Comisión Mundial de Presas identificó como prioridades la conservación de ríos y medios de subsistencia, así como también el reconocer derechos y compartir beneficios. Esto quiere decir que las presas provean las descargas para caudales ambientales y, por lo tanto, deben de diseñarse, modificarse y operarse para este fin. Si el tema de los caudales ambientales se deja para más tarde, a menudo los problemas suelen ser más graves y las soluciones conllevarán costos económicos y sociales más elevados (Dyson *et al.*, 2003).

Así, desarrollar un programa de caudal ambiental significa considerar los objetivos centrales sobre los que se habrán de basar las decisiones, determinando qué resultados se buscan y definiendo qué trueques implicarán (Arthington *et al.*, 2006; Richter *et al.*, 2006). En un sentido físico, esto significa examinar el sistema desde sus fuentes hasta el entorno costero y de estuario, incluyendo sus humedales, llanuras de inundación y sistemas conexos de aguas subterráneas. En cuanto a valores, esto significa tomar en cuenta valores ambientales, económicos, sociales y culturales en relación con el sistema total. En un programa de caudal ambiental debe tomarse en cuenta una amplia gama de objetivos, desde la protección, hasta aquellas dirigidas a satisfacer las necesidades industriales y poblacionales para su posible inclusión.

En un sistema fluvial en el que se ha asignado un exceso de agua para consumo, podrían establecerse caudales ambientales simplemente para conseguir que los ecosistemas funcionen lo suficiente como para proporcionar una base sustentable para las utilidades presentes y futuras de consumo. En los casos en que se ha comprometido en demasía y de manera grave un sistema y los valores no permiten una suficiente reasignación de recursos para restaurar todo el sistema, se pueden seleccionar ciertos tramos de río o sitios de humedales para protegerlos y para asignaciones específicas de agua (Dyson *et al.*, 2003).

Queda claro, entonces, que para establecer un caudal ambiental se necesita identificar objetivos precisos y establecer escenarios para la extracción y utilización del recurso agua. Del mismo modo que establecer caudales ambientales es una cuestión de valores, así también fijar objetivos fluviales es en gran parte un proceso sociopolítico. Todos los que participen deben, en la medida de lo posible, poseer una comprensión básica de lo que implica establecer y gestionar caudales ambientales (Arthington *et al.*, 2006; King y Brown, 2006; Richter *et al.*, 2006).

No se puede subestimar el precio por no proporcionar caudales ambientales. Resulta cada vez más claro que, a mediano y largo plazos, no satisfacer las necesidades del caudal ambiental puede tener consecuencias graves para muchos usuarios del río, iniciando por el ambiente mismo.

Los sistemas acuáticos de México, al igual que la mayoría del resto del mundo, se encuentran bajo serias amenazas de degradación debido a la falta de comprensión de la importancia ecológica que estos sistemas tienen, además de los importantes servicios ambientales que prestan. Por ello, al igual que en la mayoría de los países latinoamericanos, urge contar con una gestión integral de sistemas acuáticos que incluya y considere información precisa y multidisciplinaria (Alonso-EguíaLis, 2007).

A medida que se monitoreen y evalúen las respuestas de plantas, animales, recursos y personas, quizá haya que modificar los caudales ambientales. Este proceso se conoce como "gestión adaptable" y forma parte esencial para abordar los trueques que conllevan la definición y gestión de caudales ambientales. La mayoría de los ecosistemas fluviales se gestionan en mayor o menor grado y se acepta que la extracción de agua del río para usos humanos, abastecimiento público, irrigación y procesos industriales es necesaria para la supervivencia y desarrollo humanos (Raven *et al.*, 2000; King y Brown, 2003).

Conclusiones

En forma creciente, en todo el mundo se han identificado los conflictos por el insuficiente suministro de agua, al mismo tiempo que se observa una mayor

conciencia en relación con la necesidad de dedicar una porción de agua de los ríos para el mantenimiento e integridad de los ecosistemas acuáticos que, mediante los servicios ambientales, benefician a las comunidades y economías.

Para propiciar el desarrollo y, a la vez, proteger y restaurar los ecosistemas naturales, los gobiernos tienen que generar normativas y apoyar la aplicación de métodos adecuados para el manejo eficiente e integrado de los recursos acuáticos.

La inclusión del ecosistema dentro de la planeación del recurso agua ha sido ardua, no nada más por la falta de comprensión de su gran importancia en procesos ecológicos de pequeña y gran escala, sino por la dificultad, el costo y tiempo requeridos para determinar la cantidad y frecuencia de los caudales ambientales que se necesitan para mantener a las especies, la función y resiliencia de los ecosistemas acuáticos, así como el bienestar de los pobladores que dependen de los ríos.

Una de las ventajas de la determinación de los caudales ambientales, en ocasiones poco considerada, consiste en que los tomadores de decisiones conocen cuánto del remanente del caudal puede ser utilizado para usos poblacionales, y cuánta alteración en los patrones de flujo natural de los ríos ha sido inducida por el consumo humano. Por lo mismo, la especificación de los caudales ambientales debe ser una tarea indispensable en la planeación sustentable del agua.

La incorporación del conocimiento en ecología de ríos ha demostrado que estos sistemas presentan alta complejidad estructural y, con ello, gran fragilidad, razones por las cuales generalmente no se alcanzaban objetivos de conservación y mantenimiento del sistema de una manera integral y a largo plazo. Tales avances representan un medio para redirigir la tendencia común que aún se observa en muchos países, en donde se hace uso de índices y métodos aplicándolos, arbitraria e indiscriminadamente, a través de diferentes regiones geográficas y tipos de ríos, sin el suficiente entendimiento de las graves implicaciones ecológicas que tiene para el sistema la reducción del flujo a una cantidad mínima, o bien, de un análisis crítico de su posible transferencia a sistemas con características diferentes a aquellas para los que fueron diseñados.

El análisis de las diversas tendencias de cálculo de caudal ambiental nos lleva a observar que estas metodologías han tenido un proceso de evolución acelerado que parte de: 1) la visible necesidad de mantener las condiciones de salud e integridad de los servicios que prestan los sistemas acuáticos epicontinentales, 2) el avance que se ha dado en el conocimiento y entendimiento de la

complejidad ecológica de estos sistemas, y su intrincada interacción con las variables hidrológicas y los ambientes que de él dependen, tal como son los humedales, y 3) la inclusión de factores sociales y económicos en la toma de decisiones para alcanzar un objetivo consensuado y más real de conservación ambiental.

No obstante de la existencia de más de doscientos métodos para la determinación de los caudales ambientales, hasta ahora ninguno ha sido aplicado a escala regional en la que se efectúe el manejo de los recursos acuáticos. Sin embargo, numerosos autores señalan que las metodologías holísticas son más apropiadas que las metodologías de simulación del hábitat, particularmente para los países en desarrollo, debido a la necesidad de enfocarse a la protección de los recursos dentro de un marco ecosistémico, de la fuerte dependencia para la subsistencia y para la generación de bienes y servicios que proporcionan los ecosistemas acuáticos; así como por la capacidad inherente de las metodologías holísticas para incorporar técnicas avanzadas de la hidráulica, herramientas para la modelación del hábitat y otro tipo de modelos predictivos, además de la inclusión de múltiples componentes del ecosistema que proporcionan mayor información.

El reconocimiento de la importancia del mantenimiento de los caudales ambientales ha detonado un interés internacional para entender las relaciones entre flujo, salud y estabilidad del ecosistema, y que este caudal puede revertir o acelerar los daños que se han venido dando. Los resultados de las investigaciones podrán ser utilizadas para minimizar o mitigar los impactos en los nuevos planes de desarrollo y uso de recurso, rehabilitar impactos causados por desarrollos hidráulicos anteriores y permitir el cálculo del costo de compensación para la población humana que sufre las consecuencias del deterioro causado por un mal manejo del recurso.

La revisión de la literatura permite ver que, en el mundo, ya se cuenta con un gran número de trabajos de aplicación de cálculo de caudal ecológico, y que su aplicación y metodología seleccionada dependen en gran medida de la disponibilidad o acceso de recursos, incluyendo tiempo, datos, presupuesto y capacidad técnica. Sin embargo, es importante remarcar que los casos de mayor éxito e impulso en la implementación de caudales ecológicos son los que se han derivado en países cuyo marco legislativo ha establecido las políticas de manejo del agua, desde una perspectiva de sustentabilidad.

La determinación de los caudales ambientales en los ríos debe constituirse como un proceso urgente pero iterativo, en el cual las acciones del administrador del agua sean evaluadas y monitoreadas para generar una recomendación que varíe en el transcurso del tiempo (modificación continua) a través de la observación,

prueba y evaluación, para lograr un manejo de adaptación e integral de los caudales ambientales.

El costo por la pérdida de los ecosistemas acuáticos es, hasta ahora, indefinido e incalculable económica y ecológicamente. Pero ante los eventos provocados por el cambio climático, debido a la variación de los regímenes de lluvia, dejan ver que no se puede seguir haciendo un mal manejo de los recursos y, mucho menos, mantener una actitud pasiva ante los fenómenos climáticos y ecológicos que aún no se entienden. Es decir, la gestión del agua en los países en desarrollo debe contemplar entre sus planes el apoyo al desarrollo científico que permita entender y, por lo tanto, dar dirección a los esfuerzos para hacer un uso sustentable de los recursos naturales, antes de que se sigan tomando decisiones cuyos altos costos ya están evidenciándose.

Literatura citada

- Alonso-EguíaLis P. 2007. Importancia del estudio de la entomofauna acuática para la conservación y manejo sustentable de sistemas dulceacuícolas de México. Pp. 51-62. En R. Novelo-Gutiérrez y P. Alonso-EguíaLis (eds.) *Simposio Internacional de Entomología Acuática Mexicana: Estado Actual de Conocimiento y Aplicación*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Sociedad Mexicana de Entomología. Jiutepec, Mor. Pp104
- Armour, C.L. y J.G. Taylor. 1991. Evaluation of the instream flow incremental methodology by U.S. Fish and Wildlife Service field users. *Fisheries* 16(5): 36-43.
- Arthington, A.H. 1998. *Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment Techniques: Review of Holistic Methodologies*. Occasional Paper No. 26/98. Land and Water Resources Research and Development Corporation: Canberra, Australia.
- Arthington, A.H. y R. Lloyd (eds.). 1998. *Logan River Trial of the Building Block Methodology for Assessing Environmental Flow Requirements*. Workshop Report. Centre for Catchment and In-stream Research and Department Natural Resources: Brisbane, Australia.
- Arthington, A.H.; S.O. Brizga, S.C. Choy, M.J. Kennard, S.J. Mackay, R.O. McCosker, J.L. Ruffini y J.M. Zalucki. 2000. *Environmental Flow Requirements of the Brisbane River Downstream of Wivenhoe Dam*. South East Queensland Water Corporation, and Centre for Catchment and In-Stream Research, Griffith University: Brisbane, Australia.
- Arthington, A.; S. Bunn, L. Poff y R. J. Naiman. 2006. The Challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems. *Ecological Applications*, 16(4): 1311-1318.
- Barrios, E.; N. Barajas, A. Rodríguez e I. González. 2007. Three models for implementation of environmental flows in Mexico. *Proceeding of 10th International Riversymposium and Environmental Flows Conference*. Brisbane Australia.

- Berkamp, G.; McCartney, M., Dugan, P., McNeely, J., Acreman, M. 2000. *Dams, Ecosystem Functions and Environmental Restoration* Thematic Review II.1 prepared as an input to the World Commission on Dams, Cape Town, www.dams.org
- Brown, C. y J. King, 2003. Environmental flows: Concepts and Methods. En R. Davis y R. Hirji (eds.) *Water Resource and Environment* Technical Note 1. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington D.C.
- Bunn, S.E. y A.H. Arthington. 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30(4):492-507.
- Cavendish, M.G. y M.I. Duncan. 1986. Use of the instream flow incremental methodology: a tool for negotiation. *Environmental Impact Assessment Review* 6: 347-363.
- Córdoba, R. y A. Iza. 2007. Environmental flows and water reform in Central America: Challenge and Opportunities for their implementation. *Proceeding of 10th International Riversymposium and Environmental Flows Conference*. Brisbane Australia.
- Dunbar M.J.; A. Gustard, M.C. Acreman y C.R. Elliott. 1998. Review of Overseas Approaches to Setting River Flow Objectives. Environment Agency R&D Technical Report W6B(96)4. Institute of Hydrology: Wallingford, U.K.
- Dyson, M.; G. Bergkamp y J. Scanlon. 2003. *Flow*. UICN. U.K. 125 pp.
- Fernández Yuste J.A.; C. Martínez Santa-María y F. Martínez Capel. 2006. Régimen ambiental de caudales en el tramo inmediato aguas abajo del embalse El Vado, Guadalajara. *Memorias del 5º Congreso Ibérico*. Faro, Portugal.
- Fischer, S. y H. Kummer. 2000. Effects of residual flow and habitat fragmentation on distribution and movement of bullhead (*Cottus gobio* L.) in an alpine stream. *Hydrobiología* 422/423: 305-317.
- García de Jalón, D. y González del Tánago, M. 2006. El concepto de caudal ecológico y criterios para su aplicación en ríos españoles. *Memorias del 5º Congreso Ibérico*. Faro, Portugal.
- García-Rodríguez, E.; R. González-Villela, P. Martínez-Austria, J. Athala-Molano y G. Paz-Soldán. 1999. *Guía de aplicación de los métodos de cálculo de caudal de reserva ecológicos en México*. CNA-IMTA. México. 190 pp.
- Gaviño, N. M. 2007. Caudales ambientales, desafíos para la región. Foro Nacional para la Determinación del Uso Ambiental del Agua o Caudal Ecológico en México. IMTA-WWF-Semarnat. Morelos, México. DVD.
- Gómez-Balandra, A.; P. Saldaña-Fabela, E. Gutiérrez-López, C. Lecanda-Terán, J. Izurieta-Dávila y R. Huerto-Delgadillo. 2007. Water allocation to set environmental flows in México. *Proceeding of 10th International Riversymposium and Environmental Flows Conference*. Brisbane, Australia.
- González Villela R. y A. Banderas Tarabay. 2007. Estudio comparativo de tres metodologías para el manejo y cálculo de caudales ambientales en el río Santiago, Nayarit, México. Congreso Nacional y Reunión Mesoamericana de Manejo de Cuencas Hidrográficas. UAQ-INE-FIRCO. México.

- Hill, M.T.; W.S. Platts y R.L. Beschta. 1991. Ecological and geomorphological concepts for instream and out-of-channel flow requirements. *Rivers* 2(3): 198–210.
- International Commission on Large Dams (ICOLD). 2000. “*Bulletin on Dams and Floods*”. Draft. París.
- IUCN, UNEP, WWF. 1991. *Caring for the Earth. A strategy for sustainable living*. Gland, Switzerland. 228 pp.
- Jiménez, J. 2005. Propuesta de caudales ambientales para el río Tempisque-Costa Rica: Resumen de aspectos biológicos e hidrológicos. Organización de Estudios Tropicales. Reporte.
- King, J.M. y R.E. Tharme. 1994. Assessment of the Instream Flow Incremental Methodology and Initial Development of Alternative. Instream Flow Methodologies for South Africa. Water Research Commission Report No. 295/1/94. Water Research Commission: Pretoria, South Africa.
- King, J.M.; R.E. Tharme y C.A. Brown. 1999. *Definition and Implementation of Instream Flows*. Thematic Report for the World Commission on Dams. Southern Waters Ecological Research and Consulting: Cape Town, South Africa.
- King, J.M.; R.E. Tharme, M.S. de Villiers (eds.). 2000. *Environmental Flow Assessments for Rivers: Manual for the Building Block Methodology*. Water Research Commission Technology Transfer Report No. TT131/00. Water Research Commission: Pretoria, South Africa.
- King, J.; C. Brown y H. Sabet. 2003. A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers. *River Research and Applications* 19 619. 639.
- King, J. y C. Brown. 2006. Environmental Flows: Sticking the balance between development and resource protection. *Ecology and Society* 11(2): 26-47.
- Loar, J.M.; M.J. Sale y G.F. Cada. 1986. Instream flow needs to protect fishery resources. Water Forum '86: World Water Issues in Evolution. Proceedings of ASCE Conference. Long Beach, California, 4-6 August, 1986.
- Ley Orgánica de España. 2007. Reglamento de Aguas. Plan Hidráulico Nacional. España.
- Lytle, D.H. y N.L. Poff. 2004. Adaptation to natural flow regime. *Trends in Ecology and Evolution* 19: 94-100.
- Milhous, R.T.; M.A. Updike and D.M. Schneider. 1989. *Physical Habitat Simulation System Reference Manual-Version 2*. Instream Flow Information Paper 26. USDI Fish and Wildlife Services, Biology Report 89(16).
- Naiman, R.J.; H. Decamps, and M. Pollock. 1993. The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity. *Ecological Applications*. 3, 209-212.
- Petts, G. E. 1989. Perspectives for ecological management of regulated rivers. Pp. 3-24. En J.A. Gore y G.E. Petts (eds.) *Alternatives in Regulated River Management*. CRC Press, Florida.
- Poff, N.J.; J.D. Allan, M.B. Bain, J.R. Karr, K.L. Prestgaard, B.D. Richter, R.E. Sparks y J.C. Stromberg. 1997. The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience* 47 (11): 769-784.

- Raven, P. J.; N. T. Homes, M. Naura y F. H. Dawson. 2000. Using river habitat survey for environmental assessment and catchment planning in the U.K. *Hydrobiologia* 422/423: 359-367.
- Revenga, C.; J. Brunner, N., Hennianger, K. Kassem and R. Payne. 2000. *Pylot Analysis of Global Ecosystem: Freshwater Ecosystem*. World Resource Institute: Washington D.C.
- Richter, B.D.; J.V. Baumgartner, J. Powell, and D.P. Braun. 1996. A method for assessing hydrological alteration within ecosystems. *Conservation Biology* 10(4): 1163-1174.
- Richter, B. D.; J. V. Baumgartner, R. Wigington y D.P. Braun. 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biology* 37: 231-249.
- Richter, B.D.; A.T. Warner, J.L. Meyer y K. Lutz. 2006. A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations. *River Research and Applications*. 22: 297-318.
- Rodríguez, C. 2007. Determinación de una metodología para estimar el caudal de compensación en los ríos de Costa Rica con base en dos estudios de caso. Taller internacional de compensación (ambiental) en sistemas regulados por proyectos hidroeléctricos. San José, Costa Rica.
- Rosenberg D. M.; P. McCully y C. M. Pringle. 2000. Global-scale environmental effects of hydrological alterations: introduction. *BioScience* 50 (9): 746-751.
- Stalnaker, C.B. and S.C. Arnette. 1976. Methodologies for the Determination of Stream Resource Flow Requirements: An Assessment. US Fish and Wildlife Services, Office of Biological Services Western Water Association.
- Stalnaker, C.B. 1982. Instream flow assessments come of age in the decade of the 1970's. Pp. 119-142. In Mason W.T. and S. Iker (eds.) *Research on Fish and Wildlife Habitat*, EPA-600/8-82-022. Office of Research and Development. US Environmental Protection Agency: Washington, D.C.
- Stalnaker, C.B. 1998. The Instream Flow Incremental Methodology. In Blazkova S.; C. Stalnaker and O. Novicky (eds.). *Hydroecological Modelling. Research, Practice, Legislation and Decision-making*, Report by US Geological Survey, Biological Research Division and Water Research Institute, Fort Collins, and Water Research Institute, Praha, Czech Republic. VUV: Praha; 9-11.
- Steward, H.J.; E.K. Madacombe, C.C. Topping. 2002. Adapting environmental flows technologies for Zimbabwe. *Proceedings of Environmenal Flows for River System and 4th International Ecohydraulics Symposium*. Southern Waters, Cape Town, South Africa.
- Stewardson, M. and C. Gippel. 1997. In-stream Environmental Flow Design: A Review. Draft Report. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Melbourne: Victoria, Australia.
- Tennant, D.L. 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries* 1(4): 6-10.
- Tharme, R.E. 1996. Review of International Methodologies for the Quantification of the Instream Flow Requirements of Rivers. Water law review final report for policy development for the Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria. Freshwater Research Unit, University of Cape Town, South Africa.

- Tharme, R.E. 2000. An overview of environmental flow methodologies, with particular reference to South Africa. Pp. 15-40. In King J.M.; Tharme R.E. and M.S. de Villiers (eds.). *Environmental Flow Assessments for Rivers: Manual for the Building Block Methodology*, Water Research Commission Technology Transfer Report No. TT131/00. Water Research Commission: Pretoria, South Africa..
- Tharme, R. E. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Reserarch and Applications* 19. 397-441.
- The Nature Conservancy (TNC). 2006. Ecological limits of hydrologic alteration. Integrating environmental flows with regional water management. The Nature Conservancy. Sustainable Waters Program. Boletín. 1-4.
- Trihey, E.W. and C.B. Stalnaker, 1985. Evolution and application of instream flow methodologies to small hydropower developments: an overview of the issues. In White, R.G. and R.H. Hamre (eds.) *Proceedings of the Symposium on Small Hydropower and Fisheries*, Olson. Aurora, C.O. United States Geological Survey (USGS). 2000. <http://www.mesc.usgs.gov/rsm/IFIM.html>
- Ward, J.V. y J.A. Stanford. 1987. The ecology of regulated streams: past accomplishments and directions for future research. Pp. 391-409. In Craig, J.F. and J.B. Kemper (eds.) *Regulated Streams: Advances in Ecology*. Plenum Press: New York.
- World Commission on Dams (WCD). 2000. Dams and Development. A New Framework for Decision-making. The report of the World Commission on Dams. Earthscan Publications: London.
- World Commission on Environment and Development. 1987. *Our Common Future*. Oxford University Press, Oxford.
- World Meteorological Organization (WMO). 1992. International Conference on Water and the Environment: development issues for the 21st Century. 26-31 January 1992, Dublin, Ireland, The Dublin statement and report of the conference, World Meteorological Organization, Hydrology and Water Resources Department, Geneva, Switzerland.

Nota

¹ The Brisbane Declaration. Environmental Flows are Essential for Freshwater Ecosystem Health and Human Well-Being. 10th International Riversymposium and International Environmental Flows Conference. Australia. www.riversymposium.com.