

ALTERACIONES DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO FLUVIAL Y CONSIDERACIONES SOBRE CAUDALES AMBIENTALES

Por ALBA PUIG*, HÉCTOR OLGUÍN SALINAS** y ANALÍA CASTRO***

Resumen:

La mayoría de los ríos del mundo evidencian un aumento en el deterioro tanto en la calidad como en la cantidad de sus aguas. El objetivo de este trabajo es destacar la relevancia del régimen hidrológico para el funcionamiento sostenible de ríos y sistemas fluviales, los que mantienen biodiversidad y proveen servicios ecosistémicos fundamentales para la humanidad. Las alteraciones hidrológicas, como las originadas por numerosas represas, generan efectos ecológicos y sociales, pero la práctica de establecer caudales mínimos resulta claramente insuficiente para superar estos efectos. En este artículo se brinda una visión actualizada de avances en investigaciones, así como enfoques y marcos propuestos para pautar caudales ambientales, a fin de conservar o restaurar la sostenibilidad fluvial. La retrospectiva del concepto de caudal ambiental permite visualizar cómo se vuelve cada vez más abarcativo y relevante para la gestión integrada de recursos hídricos, hasta llegar a proponerse la consideración de diferentes marcos de gobernanza. La identificación de fortalezas y debilidades en la experiencia reciente de España, con actualizada normativa en el tema, también provee argumentos y criterios para el debate sobre las alteraciones del régimen hidrológico y el modo de mitigarlas mediante caudales ambientales apropiados. Este panorama pue-

* Doctora en Ciencias Biológicas (UBA). Jefa de la División Limnología del Museo Argentino de Ciencias Naturales (MACN-CONICET). Investigadora de Proyecto multidisciplinario UBACYT (2014-2017) 20020130100047BA (Instituto Gioja, Fac. de Derecho) dirigido por Dra. Capaldo, liderando la línea ecológica. Ex Coordinadora de Subproyectos por Acuerdo con la OEA y Miembro del Comité de Expertos en Ecosistemas Acuáticos Continentales de IABIN (Inter-American Biodiversity Information Network). E-mail: apuig@macn.gov.ar

** Doctor en Ciencias Biológicas (UBA) y Máster en Ecología y Sistemática (Universidad Católica de Valparaíso, Chile). Investigador y docente del Depto. Ecología, Genética y Evolución - IEGEBA, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA. Investigador Formado de Proyecto multidisciplinario UBACYT (2014-2017) 20020130100047BA (Instituto Gioja, Fac. de Derecho) dirigido por la Dra. Griselda Capaldo y Codirector de Proyecto PICTO (2013-2016) 2010-0128. E-mail: holguin@ege.fcen.uba.ar

*** Técnica Superior en Ecología. Estudios parciales de Lic. en Gestión Ambiental (Fac. de Cs. Humanas, Univ. Nacional del Centro de la pcia. de Buenos Aires, Tandil). Integrante de la División Limnología del MACN-CONICET. Participante en variadas actividades de proyectos como IABIN, investigaciones ecohidrológicas y transferencia en la Reserva MaB Delta del Paraná, entre otros. E-mail: acastro@macn.gov.ar

de resultar especialmente enriquecedor para países de la región, donde el desarrollo de la temática, en general, aún parece incipiente.

Palabras clave:

Régimen hidrológico, ríos, represas, alteración, caudal ambiental.

Abstract:

Most of the world's rivers show an increase in the deterioration in their water quality and quantity. The aim of this work is to highlight the relevance of the hydrological regime for the sustainable functioning of rivers and river systems, which maintain biodiversity and provide ecosystem services essential for humanity. Hydrological alterations, such as those due to many dams, have ecological and social effects. The practice of establishing minimum river flows is clearly insufficient to overcome these effects. This article provides an updated overview of research advances, as well as proposed approaches and frameworks to develop environmental flows for conserving or restoring the river sustainability. The retrospective of the environmental flow concept displays how it is becoming increasingly comprehensive and relevant for the integrated management of water resources, until reaching the proposal to consider different governance frameworks. The identification of strengths and weaknesses in the recent experience of Spain, with updated regulations on the subject, also provides support and criteria for the debate on the hydrological regime alterations and the mode to mitigate them through appropriate environmental flows. This overview may be especially rewarding for countries in the region, where in general the development of this issue still seems emerging.

Keywords:

Flow regime, rivers, dams, alteration, environmental flows.

INTRODUCCIÓN

El cambio global actual comprende modificaciones a nivel mundial producidas por cambios en el uso del suelo, cambios geopolíticos, abuso en la explotación de recursos naturales renovables y no renovables, degradación del medio natural, y los consecuentes procesos de pérdida de biodiversidad, desertificación, calentamiento global y cambio climático¹. Estas transformaciones se agudizan por la intensa conexión entre las distintas regiones del planeta (modelos económicos globales, división internacional de las economías).

En este marco, el agua dulce representa un factor crítico, con demandas en aumento y problemas crecientes para disponerla en cantidad y calidad apro-

¹ Thiessen, H.; Brklacich, M.; BREULMANN, G. *et al.* (eds.), *Communicating Global Change Science to Society. An Assessment and Case Studies*, SCOPE 68, Island Press, Washington, DC, 2007, 215 ps.

piada. En particular, la necesidad humana de agua dulce parece haber pasado por alto los beneficios vitales de conservar saludables los ecosistemas de agua dulce y de mantener el agua de los cursos naturales. Sin embargo, hay un reconocimiento creciente de que aquellos ecosistemas que mantienen su integridad funcional y su complejidad biológica proveen diversos y valiosos servicios esenciales para la sociedad.

Las personas dependen de los ecosistemas acuáticos para mucho más que agua, energía y transporte. Los ecosistemas acuáticos sanos proporcionan otros elementos básicos de supervivencia, mejoran la salud de la comunidad, aumentan la seguridad y favorecen las buenas relaciones sociales. La noción de este conjunto de servicios ecosistémicos, generalmente subvalorado, recién se está incorporando en la comunidad internacional de gestión del agua, gracias a los esfuerzos de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio².

Estos servicios ecosistémicos³ (“procesos y condiciones a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies que los conforman sostienen y satisfacen la vida humana”) incluyen, entre otros, el control de inundaciones, el transporte, la recreación, la purificación de aguas, el hábitat para organismos, la producción de peces y otros alimentos y de bienes de mercado. Estos servicios, además, tienen valores económicos reales, a menudo ignorados en los análisis de costo-beneficio, incluyendo costos relacionados con la disminución de beneficios, medidas correctivas, reparación de daños y atención de la salud. En consecuencia, los esfuerzos para conservar los ecosistemas también contribuyen al bienestar social y a la reducción de costos económicos. Considerando la perspectiva del cambio climático, la protección de la integridad de los ecosistemas aumenta la probabilidad de conservar su capacidad adaptativa para mantener dichos servicios⁴.

El efecto acumulativo a escala global de las transformaciones humanas locales alcanzó tal magnitud que se ha propuesto denominar “Antropoceno” a la época presente⁵. Una gran proporción de humedales se ha eliminado y numerosas represas se han construido. Los ecosistemas acuáticos están siendo severamente alterados o destruidos, a una tasa mayor que en cualquier otro momento de la historia humana y mucho más rápido de lo que están siendo restaurados.

² MEA (Millennium Ecosystem Assessment), “Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis”, Washington DC, World Resources Institute, 2005.

³ La tipología de servicios ecosistémicos adoptada por la Evaluación de Ecosistemas del Milenio distingue: servicios de aprovisionamiento, como alimentos, agua o energía; servicios de regulación, como regulación climática, descomposición de residuos, purificación del agua y aire o control de plagas y enfermedades; servicios de apoyo, como dispersión y reciclado de nutrientes, dispersión de semillas o producción primaria; y servicios culturales, como inspiración cultural y espiritual, experiencias recreativas o descubrimiento científico.

⁴ BARON J. S.; POFF, N. L.; ANGERMEIER, P. L. *et al.*, “Sustaining healthy freshwater ecosystems”, en *Issues in Ecology*, 2004, nro. 127, ps. 52-58, 68-75.

⁵ CRUTZEN, P. J. y STOERMER, E. F., “The “Anthropocene””, en *Global Change Newsletter*, 2000, nro. 41, ps. 17-18.

Estas transformaciones han alterado drásticamente los procesos fundamentales de las cuencas hidrológicas que regulan las magnitudes y tasas de agua, sedimentos y nutrientes que llegan a los ambientes acuáticos, provocando diversos grados de degradación ecológica⁶.

Los crecientes problemas del agua afectarán principalmente a las personas cuya subsistencia depende más directamente de los servicios proporcionados por los ecosistemas locales. En ecosistemas acuáticos degradados resulta costoso o, a menudo, imposible reemplazar los beneficios brindados gratuitamente por ecosistemas sanos. Por ese motivo, las decisiones relacionadas con la asignación del agua siempre deberían incluir previsiones para mantener la integridad de los ecosistemas de agua dulce, procurando un mejor balance con respecto a las necesidades extractivas de la sociedad⁴.

La evidencia científica muestra que los ecosistemas fluviales dependen básicamente de su cuenca hidrológica, por lo que resultan muy influenciados por los usos y las modificaciones humanas en la misma. La propia red fluvial es importante para la continuidad de los procesos de los ríos. La integridad y sustentabilidad de estos ecosistemas depende de que el caudal se mantenga dentro de su rango de variación natural. De modo similar, se requiere que los sedimentos, las características de temperatura y luz, la entrada de nutrientes y otros compuestos químicos, así como las poblaciones de organismos, fluctúen dentro de sus rangos naturales, sin ser mantenidos en niveles constantes ni tampoco experimentar oscilaciones que excedan los rangos históricos⁴.

El flujo del agua a través del paisaje en su camino hacia la desembocadura de cada río transcurre en tres dimensiones, conectando la porción superior del cauce con la inferior, los cauces fluviales con las llanuras de inundación y humedales ribereños, y el agua superficial con el agua subterránea. Las fluctuaciones naturales del caudal del agua son fundamentales para la sostenibilidad a largo plazo y la productividad de los ecosistemas fluviales y sus zonas ribereñas. Los ríos naturales se caracterizan por la variación temporal y espacial en la magnitud, frecuencia, duración, momento y tasa de cambio de sus caudales. Estas características referidas a un río específico, o a un conjunto de ríos de una región determinada, fueron las que moldearon a escalas de tiempo evolutivo (milenios) los rasgos de las especies que los habitan, así como la estructura de sus procesos ecológicos y la productividad de sus comunidades acuáticas y ribereñas. Consecuentemente, mantener la variabilidad del caudal resulta fundamental para conservar los procesos ecológicos y las comunidades biológicas⁷.

El desafío consiste en encontrar cómo la sociedad puede extraer el agua que necesita y, al mismo tiempo, proteger la complejidad natural y la capaci-

⁶ POFF, N. L.; BLEDSOE, B. P. y CUHACIYAN, C. O., "Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems", en *Geomorphology*, 2006, nro. 79(3), ps. 264-285.

⁷ NAIMAN, R. J.; LATTERELL, J. J.; PETTIT, N. E. *et al.*, "Flow variability and the biophysical vitality of river systems", en *Comptes Rendus Geoscience*, 2008, nro. 340(9), ps. 629-664.

dad adaptativa fundamental de estos ecosistemas. En un mundo donde los ríos son cada vez más aprovechados para usos humanos, por lo que evidencian características sustancialmente alteradas en su caudal, representa todo un desafío científico determinar los patrones de caudal requeridos para su sostenibilidad ambiental⁷. También se requiere un cambio fundamental en las políticas de manejo del agua, ya que actualmente suelen estar fragmentadas y orientadas por el consumo humano, lo que no permite superar los problemas de la creciente degradación de los ecosistemas fluviales⁴.

A diferencia de artículos anteriores, donde nos hemos enfocado principalmente en la temática de la calidad del agua^{8, 9 y 10}, en el presente nos centramos en aspectos relativos a su cantidad. Para esto, complementamos el conocimiento adquirido en función del propio trabajo de investigación sobre alteraciones del régimen hidrológico, con una selección de aportes bibliográficos actualizados de los mejores referentes científicos mundiales (especialmente en ecología) de caudales ambientales.

1. EL RÉGIMEN HIDROLÓGICO

Los estudios hidrológicos tradicionales del caudal de un río se enfocaron principalmente en las variaciones de su magnitud (es decir, la cantidad de agua que pasa por una sección del río por unidad de tiempo, expresada, por ejemplo, en m³/s). También abordaron estudios sobre la frecuencia o la duración de eventos de caudal de especial interés, como inundaciones o sequías.

Más recientemente, el denominado ‘paradigma del régimen hidrológico natural’¹¹, reconoció cinco componentes principales en la caracterización del régimen hidrológico de un río natural: la magnitud, la frecuencia, la duración, el momento y la tasa de cambio de sus eventos de caudal. Estos componentes tienen un efecto directo y significativo sobre los organismos. Más aún, estos componentes del régimen hidrológico mantienen de diversas maneras las condiciones físicas, químicas y biológicas que sustentan la diversidad biológica y los servicios de los ecosistemas fluviales¹¹. Por este motivo, el régimen hi-

⁸ PUIG, A. y OLGUÍN, H., “Cursos fluviales bonaerenses: estrés químico y ecohidrología”, ps. 55-67. “Watercourses in Buenos Aires: chemical stress and ecohydrology”, ps. 187-199, en CAPALDO, G. (ed.), *Sinergias Ambientales entre las Aguas Continentales y las Marinas*, Buenos Aires, Mare Magnum (WCS-CONICET), 2006, 256 ps.

⁹ PUIG, A., “Raising environmental awareness on aquatic pollution in the Matanza-Riachuelo River basin, Argentina”, ps. 422-435, en SCARPATI, O. E. y JONES, J. A. A. (eds.), *Environmental change and rational water use*, Buenos Aires, Orientación Gráfica Editora, 2007, 458 ps.

¹⁰ PUIG, A. y OLGUÍN, H., “Agua, ecosistemas y sustentabilidad: del desafío global al Delta del Paraná y su Reserva de Biósfera”, Cap. Agua, Ecología y Salud, ps. 83-104. Extended Abstract: ps. 535-538, en CAPALDO, G. (ed.), *Gobernanza y Manejo Sustentable del Agua*, Serie Sinergias Ambientales, Buenos Aires, MNEMOSYNE, 2011, 702 ps.

¹¹ POFF, N. L.; ALLAN, J. D.; BAIN, M. B. *et al.*, “The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration”, en *BioScience*, 1997, nro. 47, ps. 769-784.

drológico es considerado el principal factor de control para los ríos, es decir, la ‘variable maestra’ para mantener la integridad de los ecosistemas fluviales. Actualmente, el paradigma del caudal ambiental se plantea como relevante para la gestión de los recursos hídricos, enmarcada dentro del ámbito más amplio de la sostenibilidad ambiental. El mantenimiento de la integridad ecológica de un río requiere mantener la gama completa de eventos de caudal (extremadamente bajos, bajos, pulsos altos, pequeñas y grandes inundaciones), ya que todos cumplen funciones ecológicas importantes, incluso los eventos extremos. Por ejemplo, durante las inundaciones comunes, los peces y otros organismos pueden moverse aguas arriba, aguas abajo o más allá del cauce, en las llanuras de inundación o humedales inundados, lo que les brinda acceso a hábitats adicionales, como canales secundarios, remansos y zonas bajas inundadas, áreas que pueden proporcionar recursos alimenticios importantes. Las grandes inundaciones típicamente reorganizan la estructura física y biológica de un río y de su llanura de inundación, y, si bien pueden eliminar muchos organismos, en muchos casos crean ventajas competitivas para otras especies. Los caudales muy bajos durante períodos de sequía también pueden ser estresantes para muchos organismos, por ejemplo, reduciendo sus hábitats disponibles o aumentando la concentración de compuestos químicos, pero pueden proporcionar condiciones necesarias o convenientes para otras especies, por ejemplo, concentrando presas acuáticas. El mantenimiento dentro de rangos naturales de ambos extremos de caudal contribuye a mantener la biodiversidad del sistema fluvial y, en particular, limita la proliferación de especies invasoras, usualmente no adaptadas a tales condiciones extremas.

2. LAS REPRESAS Y LA ALTERACIÓN DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO

Las alteraciones humanas del caudal de los ríos rara vez tuvieron en cuenta las consecuencias. La modificación humana actual del ciclo hidrológico global a través de la construcción y operación de cientos de miles de represas y de desvíos de agua ha alterado los procesos fluviales, conduciendo al debilitamiento del funcionamiento de los ecosistemas fluviales y a la pérdida de la biodiversidad en todo el mundo¹².

Durante miles de años se han construido represas y embalses para variados propósitos, incluyendo el control de inundaciones, el abastecimiento de agua, el riego, la generación de energía hidroeléctrica, la navegación y la recreación¹³. Las represas y embalses juegan un papel importante en el control y manejo de

¹² POFF, N. L. y MATTHEWS, J. H., “Environmental flows in the Anthropocene: past progress and future prospects”, en *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, nro. 5(6), ps. 667-675.

¹³ WCD (World Commission on Dams), “Dams and Development: A New Framework for Decision-making: the Report of the World Commission on Dams”, Earthscan, 2000.

los recursos hídricos. Mitigar grandes inundaciones, garantizar el suministro de agua y proporcionar energía hidroeléctrica son beneficios que han permitido a las sociedades mejoras en la salud humana, producción extensiva de alimentos y crecimiento económico.

El número global de represas y embalses construidos y los volúmenes de agua almacenada han aumentado dramáticamente desde mediados del siglo pasado y probablemente continuarán incrementándose, particularmente en las regiones menos industrializadas. Las represas ya son una característica ubicua de los ríos modernos: más de 45.000 grandes presas (de más de 15 m de altura) en operación en todo el mundo¹⁴ acumulan una cantidad de agua equivalente a una sexta parte del caudal total que los ríos vierten a los océanos cada año¹⁵. En contraste con este panorama, resulta llamativa la considerable incertidumbre en la estimación de su número (especialmente en el caso de las de menor tamaño, que solo en Estados Unidos superarían el millón). Esto llevó a generar una base global de datos de embalses y represas (GRanD) revisada y accesible¹⁶. De acuerdo a esta base, los mayores volúmenes totales de agua acumulados en embalses se concentran en Canadá, Rusia, Estados Unidos, Brasil y China (> 450 km³ en cada país). En la Tabla 1 se muestra el número de embalses y el volumen total de agua embalsada para una serie de ríos seleccionados, incluyendo el Río Paraná¹⁶. Como consecuencia del elevado número de represas, actualmente muchos ríos tienen un caudal completamente regulado. Por ejemplo, en el sistema fluvial del Río Mississippi hay más de 40.000 represas de más de 6 m de altura¹⁷.

En la Figura 1.a) se muestra la distribución mundial por país, considerando el número de embalses por rangos¹⁶. Poniendo el foco en Sudamérica, la Figura 1.b) muestra el primer mapa de riesgo global de impactos potenciales de conjuntos de embalses sobre el régimen hidrológico aguas abajo. Este mapa, elaborado por esta iniciativa a una resolución de tramos individuales de río¹⁶, se basa en la estimación del grado de regulación como la proporción del caudal anual del río que puede ser almacenada por un embalse o por un conjunto de embalses, lo que brinda una primera aproximación sobre su impacto potencial en el caudal aguas abajo.

En paralelo, puede observarse en la Figura 1.c), como una posible imagen futura, el mapa con las numerosas represas hidroeléctricas planeadas para

¹⁴ BERGA, L.; BUIL, J. M.; BOFILL, E. *et al.* (eds.), *Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the 21st Century*, Two Volume Set: Proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century, 22nd International Congress on Large Dams (ICOLD), Barcelona, España, 18 de junio de 2006. CRC Press.

¹⁵ HANASAKI, N.; KANAE, S. y OKI, T., "A reservoir operation scheme for global river routing models", en *Journal of Hydrology*, 2006, nro. 327(1), ps. 22-41.

¹⁶ LEHNNER, B.; REIDY LIERMANN, C.; REVENGA, C. *et al.*, "High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management", en *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, nro. 9(9), ps. 494-502.

¹⁷ SYVITSKI, J. y HIGGINS, S., "Going under: The world's sinking deltas", en *New Scientist*, 2012, nro. 216(2893), ps. 40-43.

Sudamérica¹⁸, de acuerdo a información recopilada entre 2009 y 2011 de cada país por un investigador de The Nature Conservancy (TNC). Esta expansión hidroeléctrica planeada suma 2.215 proyectos, lo que implicaría agregar 673 represas a ríos actualmente no regulados y 388 represas a ríos ya represados.

A medida que fue aumentando el número de represas construidas se volvieron más evidentes los impactos negativos de estas estructuras en los ecosistemas fluviales. Las represas y embalses, especialmente los de gran tamaño, pueden inducir considerables perjuicios y costos a las sociedades humanas, por ejemplo, por desplazamiento/reasentamiento de pobladores, cambios en la seguridad alimentaria y del agua o aumento en la incidencia de enfermedades transmisibles¹⁹. Las represas tienen importantes impactos sobre la integridad ecológica y sobre la productividad de los sistemas fluviales, afectando la provisión de importantes servicios y recursos para comunidades rurales y economías regionales²⁰.

Los efectos pueden acumularse por muchos cientos de kilómetros aguas abajo y aguas arriba del dique (por ejemplo, por consecuencia de la fragmentación del sistema fluvial, reduciendo su conectividad estructural y funcional), pudiendo modificar, entonces, ecosistemas fluviales no solo localmente, sino también a escala regional. Los embalses, además de fragmentar hábitats acuáticos²¹, impidiendo no solo el movimiento de especies, sino también el transporte aguas abajo de nutrientes y sedimentos, generan globalmente una pérdida de agua por evaporación que supera el consumo de agua doméstico e industrial juntos²², y se estima que son responsables de al menos un 4% del calentamiento global inducido por el hombre en forma de emisiones de gases de efecto invernadero, como metano²³.

La regulación del caudal se considera una de las principales consecuencias ecológicas adversas de represas y embalses²⁴. Muchas especies fluviales están

¹⁸ KAREIVA, P. M., "Dam choices: Analyses for multiple needs", en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, nro. 109, ps. 5553-5554.

¹⁹ SCUDDER, T. T., *The Future of Large Dams: Dealing with Social, Environmental, Institutional and Political Costs*. Taylor & Francis, 2012.

²⁰ ARTHINGTON, Á. H.; NAIMAN, R. J.; MCCLAIN, M. E. *et al.*, "Preserving the biodiversity and ecological services of rivers: new challenges and research opportunities", en *Freshwater Biology*, 2010, nro. 55(1), ps.1-16.

²¹ NILSSON C.; REIDY, C. A.; DYNESIUS, M., *et al.*, "Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems", en *Science*, 2005, nro. 308, ps. 405-408.

²² SHIKLOMANOV, I. A., "Appraisal and assessment of world water resources" en *Water International*, 2000, nro. 25, ps. 11-32.

²³ LIMA, I. B. T.; RAMOS, F. M.; BAMBACE, L. *et al.*, "Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective", en *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2008, nro. 13, ps. 193-206.

²⁴ BUNN, S. E. y ARTHINGTON, A. H., "Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity", en *Environmental Management*, 2002, nro. 30 (1), ps. 492-507.

adaptadas a, y sincronizadas con, patrones específicos de caudal fluvial. Estos patrones son los que inducen a una especie a reproducirse, dispersarse, migrar, alimentarse o evitar depredadores. Por eso, las alteraciones del patrón natural de caudal pueden interrumpir los ciclos de vida y los procesos ecológicos. La operación de las represas suele reducir los máximos caudales, aumentar y estabilizar los caudales bajos, o embalsar o desviar los caudales fluviales parcial o totalmente. Estas alteraciones conducen a numerosos impactos físicos y ecológicos en los ecosistemas de agua dulce, terrestres e incluso en zonas marinas de influencia, afectando a las especies que dependen de los mismos²⁵.

Los avances en la comprensión científica y las herramientas técnicas desarrolladas contribuyen a dirigir expectativas sociales y ecológicas hacia mejoras en la localización, el diseño y la operación de las represas para disminuir impactos adversos. Esto aumenta el interés en la adaptación de las operaciones de represas hacia la erogación de caudales ambientales. Como los efectos aguas abajo de las alteraciones del caudal pueden ser de gran alcance, Poff *et al.*²⁶ propusieron el marco de Límites Ecológicos de Alteración Hidrológica (ELOHA) que, mediante modelado y análisis hidrológico a escala regional, puede informar a la gestión sobre caudales ambientales, especialmente cuando se dificulta la evaluación de ríos y sitios individuales.

Durante el último siglo, muchos grandes proyectos de agua se caracterizaron por ganancias económicas a expensas del bienestar social, siendo sus beneficios, además, raramente compartidos en forma equitativa¹³. En el ámbito de la gestión y planificación sostenible se viene argumentando sobre la importancia de evaluar mejor el rol y los efectos de represas y embalses y de minimizar los costos sociales y ambientales asociados, mientras se aprovechan los beneficios¹³. La investigación científica se reconoce como fundamental para aportar a esta meta, requiriéndose datos y herramientas de evaluación adecuados para el avance de nuevos y más rigurosos estudios, especialmente a escalas regionales.

3. EVALUACIÓN DE ALTERACIONES DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO

El desarrollo de indicadores hidrológicos para la descripción de los componentes del régimen hidrológico (es decir, magnitud, frecuencia, duración, momento y tasa de cambio) ha permitido su creciente aplicación en la investiga-

²⁵ CARLISE, D. M.; WOLOCK, D. M. y MEADOR, M. R., "Alteration of streamflow magnitudes and potential ecological consequences: a multiregional assessment", en *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, nro. 9, ps. 264-270.

²⁶ POFF, N. L.; RICHTER, B. D.; ARTHINGTON, A. H. *et al.*, "The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards", en *Freshwater Biology*, 2010, nro. 55, ps. 147-170.

ción de los ríos. Los indicadores de alteración hidrológica (IHA)²⁷ representan a estos componentes y su alteración puede proporcionar una primera aproximación sobre el riesgo ecológico consecuente para los ecosistemas fluviales. Por lo tanto, los IHA representan una contribución concreta para cerrar la brecha entre la hidrología y la ecología.

El poder del método de los IHA es que puede usarse para sintetizar prolongados períodos de datos hidrológicos diarios en una serie mucho más manejable de parámetros ecológicamente relevantes²⁸. Richter *et al.*²⁹ consideraron, además, varios métodos para superar dificultades en disponibilidad de datos, permitiendo ampliar registros hidrológicos, completar datos faltantes o estimar datos hidrológicos diarios mediante modelos de simulación. Cuando se aplican los IHA para analizar el cambio entre dos períodos de tiempo, se puede implementar, además, el Análisis de Rango de Variabilidad (RVA) descrito en Richter *et al.*²⁹, que aporta una base para pautar caudales ambientales que no excedan determinada variabilidad con respecto a las condiciones naturales.

La definición más reciente de los componentes del caudal ecológico (EFC), que comprenden los caudales extremadamente bajos, caudales bajos, pulsos de caudal alto, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones, representa un intento de identificar automáticamente y calcular estadísticas de estos diferentes eventos hidrológicos. Estos componentes, que son considerados ecológicamente relevantes en un amplio espectro de regiones hidroclimáticas, permiten una caracterización de las condiciones de caudal que puede ser más fácilmente traducida a recomendaciones de caudal ambiental³⁰.

Más adelante se volverá a mencionar el marco ELOHA y su progresión en el marco de Gestión Sostenible de Alteraciones Hidrológicas (SUMHA), los que, basándose en clasificaciones, proponen estrategias para avanzar a escala regional, incluso en ríos donde falta información básica, dado que los autores estiman que la estrategia de evaluar río por río no permitirá llegar a tiempo, considerando las perspectivas futuras.

4. EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE CAUDAL AMBIENTAL

En respuesta a la rápida intensificación del desarrollo de infraestructura de recursos hídricos que llevó a una severa regulación de caudal y desvío de

²⁷ RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; POWELL, J. *et al.*, "A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems", en *Conservation Biology*, 1996, nro. 10, ps. 1163-1174.

²⁸ TNC (The Nature Conservancy), "User's manual for the Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) software version 7.1", 2011, <http://conserveonline.org/workspaces/iha>.

²⁹ RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; WIGINGTON, R. *et al.*, "How much water does a river need?", en *Freshwater Biology*, 1997, nro. 37, ps. 231-249.

³⁰ MATHEWAS, R. y RICHTER, B. D., "Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting", en *Journal of American Water Resources As*, 2007, nro. 43, ps. 1400-1413.

aguas superficiales, con consecuentes impactos sobre la biodiversidad, surgió a mediados del siglo XX en países desarrollados de Europa y en Estados Unidos el concepto de caudales ambientales, a fin de fortalecer una gestión del agua ecológicamente consciente. En ese entonces, había poca o ninguna consideración de las necesidades de agua de los ecosistemas fluviales o de las personas directamente dependientes de ellos para su subsistencia. En los últimos 25 años, la ciencia del caudal ecológico se ha ido enfocando en el régimen hidrológico natural, ya que este constituye la base para su evaluación y representa un marcador medible de rendimiento para los que operan infraestructura y los que regulan la asignación de aguas³¹. En la última década, los avances de la ecohidrología permitieron a investigadores de caudal ecológico refinar este enfoque.

La definición actual de caudales ambientales es la expresada en la Declaración de Brisbane (Australia) de 2007: “cantidad, momento y calidad de los caudales de agua necesarios para mantener ecosistemas de agua dulce y de estuario, así como el sustento y bienestar humano que dependen de estos ecosistemas”³². El objetivo primordial de los caudales ambientales es adecuar la magnitud y el momento de los caudales salientes de la infraestructura de agua (represas, por ejemplo) para restaurar el régimen hidrológico natural o el normativo, a fin de beneficiar a los tramos del río que se encuentran aguas abajo y a sus ecosistemas ribereños.

La naturaleza general y pragmática del concepto de caudal ambiental ha favorecido su flexibilidad para abarcar una variedad de métodos de evaluación y promover la síntesis y convergencia de diversas aproximaciones. El concepto de caudal ambiental, que engloba la idea simple de una nueva operación de la infraestructura del agua, debe aplicarse basándose en el conocimiento científico y abordando las realidades de los complejos sistemas social-ecológicos, donde compiten variados intereses por fuentes de agua limitadas.

Antes de la década de 1980, los caudales ambientales fueron aplicados en un modo ‘reduccionista’, apuntando a establecer aguas abajo de grandes represas individuales caudales mínimos para alguna especie en particular valorada por la sociedad (generalmente un pez), sobre todo en Estados Unidos y Europa occidental. Poff y Matthews³³ proveen una recopilación histórica sumamente valiosa del posterior desarrollo conceptual y práctico de los caudales ambientales, considerando tres períodos.

En el primer período (desde fines de los 1980s hasta mediados de los 1990s), la teoría ecológica comenzó a informar a la gestión de recursos hídricos

³¹ MATTHEWS, J. H.; FORSLUND, A.; McCLAIN, M. E. *et al.*, “More than the fish: environmental flows for good policy and governance, poverty alleviation and climate adaptation”, en *Aquatic Procedia*, 2014, nro. 2, ps. 16-23.

³² <http://www.watercentre.org/news/declaration>.

³³ POFF, N. L. y MATTHEWS, J. H., “Environmental flows in the Anthropocene: past progress and future prospects”, en *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, nro. 5(6), ps. 667-675.

sobre la importancia de la dinámica hidrológica para mantener la estructura y las funciones de los ecosistemas, perspectiva que se convirtió en la base del marco actual de caudal ambiental.

La aplicación de caudales ambientales en Australia y Sudáfrica, centrada en varios objetivos ecológicos en sitios particulares que requerían conservación o restauración, contribuyó al desarrollo de principios y enfoques ampliamente utilizados actualmente.

Por otro lado, el interés académico en caracterizar el régimen hidrológico natural y su papel en los ecosistemas fluviales, principalmente en aquellos de caudal sin modificar, aumentó a partir del mayor reconocimiento de los efectos de los disturbios naturales en la regulación de los ecosistemas fluviales. Poff y Ward³⁴ desarrollaron un sistema de clasificación de cursos fluviales basado en el análisis de características ecológicamente relevantes del caudal, tales como la magnitud, frecuencia, momento y predictibilidad de los eventos extremos (es decir, inundaciones y sequías). Estos eventos actúan como disturbios naturales claves para mantener el funcionamiento de los ecosistemas fluviales y la biodiversidad nativa. En Australia y Nueva Zelanda se realizaron esfuerzos similares de clasificación hidrológica motivados por consideraciones ecológicas.

Por su parte, el interés en las alteraciones humanas de los caudales naturales representó un avance hacia una visión unificadora que enlazó enfoques académicos y pragmáticos. En Estados Unidos, TNC desarrolló un marco para clasificar en sitios de interés la alteración ecológicamente relevante de la variabilidad del caudal debida a represas. De este modo, el caudal de un período de pre-impacto (pre-represa), representando una condición de referencia, podía compararse con el caudal de un período después del impacto (post-represa) para cuantificar el grado de alteración ecológicamente relevante de indicadores del caudal y proporcionar así un índice de riesgo ecológico.

Estas tres perspectivas convergieron a mediados de los 1990s con la publicación del concepto de caudales normativos, el concepto de régimen hidrológico natural, y el método de los indicadores de alteración hidrológica (IHA). En conjunto, engloban la idea básica de que se requiere una gama de caudales con ciertas características de magnitud, frecuencia, duración, momento, previsibilidad y tasa de cambio para mantener la biodiversidad nativa y las funciones del ecosistema, y que la alteración en estos componentes clave del régimen hidrológico lleva a la alteración ecológica. Estas publicaciones establecieron el principio de que la variabilidad del caudal natural (es decir, el caudal histórico reciente) es la piedra angular para la restauración de un río. Si bien otros factores son reconocidos como ecológicamente significativos (por ejemplo, el transporte de sedimentos, el régimen de temperatura, la configuración geomorfológica),

³⁴ POFF, N. L. y WARD, J. V., "Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns", en *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, nro. 46(10), ps. 1805-1818.

resultan menos manejables por intervenciones inmediatas que puedan restaurar ecosistemas aguas abajo. En esta etapa, ya está explícita en el concepto de caudal ambiental la noción de que la alteración hidrológica deteriora funciones del ecosistema y de que los índices hidrológicos de alteración podían utilizarse como sustitutos (o indicadores) del deterioro ecológico.

Durante este período, el foco en la temática fue principalmente científico y técnico (con participación de investigadores, profesionales de la restauración y ONG ambientales dedicados a la conservación y ecología fluvial) y la mayoría de la actividad se produjo en países desarrollados con importante capacidad científica y de gestión hídrica, como Estados Unidos, Europa occidental, Sudáfrica y Australia.

En el segundo período (hasta mediados de los 2000s), los científicos y profesionales interesados en el caudal ambiental comenzaron a centrarse en cómo gestionar los ríos de una manera ecológicamente sostenible. Entre las principales contribuciones figura la articulación de los principios de alteración del caudal con ejemplos documentados de efectos ecológicos, entendibles por administradores de la infraestructura hídrica. El argumento planteado de que los ecosistemas deberían considerarse por sus necesidades de agua como legítimos ‘beneficiarios’, merecedores de consideración ética a la par de sectores humanos, contribuyó a promover el estado de conservación de aguas superficiales, si bien frecuentemente no se concretó en la práctica.

Dada la gran huella humana en los sistemas naturales, la sostenibilidad comenzó a visualizarse en términos de disyuntivas o de balance entre necesidades en competencia de humanos y ecosistemas. La difusión amplió la conciencia pública sobre la pérdida mundial de la integridad de ecosistemas de agua dulce y de la biodiversidad. En Estados Unidos se realizaron experimentos de manejo adaptativo en algunos ríos.

La participación creciente en la temática de los caudales ambientales de ONG internacionales de conservación, especialmente TNC comprometiendo a científicos y más tarde International Union for Conservation of Nature (IUCN), World Wildlife Foundation (WWF) y Conservation International (CI), facilitó el vínculo con instituciones involucradas en recursos hídricos nacionales, sectoriales y globales. Los académicos comenzaron a visualizar a los caudales ambientales como una nueva y potencialmente poderosa herramienta de gestión, que podía incorporarse formalmente en enfoques ya establecidos de manejo de cuencas, como la Gestión Integrada de Recursos Hídricos.

Considerando los principios de alteración de caudal, algunos ingenieros de recursos hídricos de Estados Unidos comenzaron a explorar cómo modificar los esquemas de operación de una represa para permitir el beneficio ecológico aguas abajo. Científicos de agencias federales de este país, como el USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos), comenzaron a participar en investigaciones sobre alteración de caudal, lo que insinúa un perfil creciente de ciencia a nivel institucional gubernamental subyacente a la gestión sostenible.

Los gobiernos comenzaron a aplicar los principios de caudal ambiental a sistemas fluviales grandes y complejos, como el Murray-Darling en Australia. En ese país, las preocupaciones por la escasez de agua y la sostenibilidad ambiental dieron lugar a la creación de un centro de investigación cooperativa que lidera la industria del agua e instituciones de investigación mediante un programa, que continúa abordando problemas de desvíos de agua en la región árida australiana.

Este período culminó con la Declaración de Brisbane de 2007. Este evento, celebrado en el 10° Simposio Anual del Río Brisbane, Australia, reunió a más de 800 científicos, ingenieros, administradores de recursos, políticos y economistas de 57 países. La declaración de los principios de caudal ambiental que se logró ratificar resultó notable por su articulación entre la sostenibilidad ecológica y el bienestar social. Para ese entonces, la temática de los caudales ambientales se había ampliado desde una agenda relativamente estrecha de conservación a una amplia perspectiva de sostenibilidad socio-ecológica, que podría aplicarse en una gama de configuraciones de gobernanza. A su vez, las aplicaciones iniciales de caudal ambiental empezaron a moverse desde países desarrollados hacia economías emergentes.

En el tercer período (hasta el presente), la conciencia global creciente sobre los caudales ambientales involucró nuevos ámbitos y nuevos retos, incluyendo la expansión de los caudales ambientales desde la escala de represas individuales hacia escalas regionales y de planificación de toda una cuenca, así como un mayor empirismo en la ciencia ecológica.

El entendimiento de que el ciclo hidrológico global está marcadamente influido por los seres humanos llevó a nuevos estudios ecohidrológicos, que emplearon modelos hidrológicos para evaluar amenazas ambientales integradas a escala global. Estos modelos fueron usados para abordar problemas de estrés hídrico y disyuntivas entre suministro de agua para demanda agrícola o para abastecimiento de ecosistemas naturales, implicancias del cambio climático y del crecimiento de la población humana para la gestión de ríos regulados versus ríos no regulados, así como implicancias de múltiples factores de estrés para la seguridad del agua humana y la conservación de la biodiversidad en los ríos mundiales. Unos pocos modelos evaluaron explícitamente la alteración del clima y de la gestión del agua en componentes ecológicamente importantes del caudal, tales como el momento y la duración de los extremos de caudal, aportando una base para futuras evaluaciones que integren información hidrológica y ecológica de alteraciones de caudal a escala global. Durante este período, se desarrollaron bases de datos que permitieron estimar a escala mundial los efectos de las represas sobre el caudal fluvial, la captura de sedimento y la fragmentación de ecosistemas fluviales.

La mejora de los fundamentos científicos requiere el desarrollo de relaciones explícitas entre las alteraciones del caudal y sus respuestas ecológicas. El enfoque del marco ELOHA²⁶, que propuso un método para clasificar los regímenes hidrológicos, considerando patrones naturales de variación histórica,

permite el planteo científico riguroso de pautas de caudal para ríos y arroyos que carecen de extensos datos históricos hidrológicos y ecológicos. Esta síntesis de la ciencia y la práctica de caudales ambientales surgieron de la colaboración de científicos, ONG y agencias. Este marco plantea el modelado hidrológico de redes fluviales enteras, clasificando segmentos de río en tipos ecológicamente relevantes mediante indicadores de caudal, la generación de hipótesis testeables sobre respuestas ecológicas por alteración de caudal según tipos de río (definidos por el régimen hidrológico y la conformación geomorfológica) y la consideración de preferencias sociales con respecto a las condiciones ecológicas, como parte de las estrategias de gestión de caudal. Las aplicaciones del marco ELOHA, pensado para aplicarse a escala regional en una variedad de contextos de gobernanza, fueron creciendo, especialmente en Estados Unidos, y su utilidad también se comprobó en España, China y Australia.

5. EL CAUDAL AMBIENTAL Y LA GOBERNANZA DEL AGUA

El debate desarrollado en la Semana Mundial del Agua en Estocolmo en 2013 acerca del papel que debería asumir el caudal ecológico en el contexto más amplio de la gestión sostenible de los recursos hídricos concluyó que deben superarse las visiones utilitarias y reconocer que la integridad y salud de los ecosistemas acuáticos son en sí mismos indicadores de buena gobernanza, asignación eficaz, un robusto sector privado, mejor seguridad del agua y una dinámica adaptación climática³¹.

El muy bajo número de países que habían desarrollado políticas de caudal ambiental llevó a valorar aquellos mecanismos y sistemas globales que impulsen el compromiso de los países a abordar la salud de sus sistemas fluviales y, específicamente, los caudales ambientales³⁵. Las apelaciones al mantenimiento de caudales ambientales están implícitas en los acuerdos internacionales que van desde la Agenda 21 de la Cumbre de la Tierra de Río de 1992 a la Convención de Ramsar. La Convención de Naciones Unidas sobre el Derecho de Usos salvo Navegación de Cursos Acuáticos, aplicable incluso a sistemas transfronterizos, también reviste interés para los caudales ambientales. Con respecto a los Objetivos del Milenio³⁶, la presentación de un objetivo ambiental independiente (meta 7, que compromete a las naciones a garantizar la “sostenibilidad ambiental”), no refleja que el mantenimiento de la integridad de los servicios ecosistémicos es básico y de importancia central para los ocho objetivos³⁵. De modo similar, muchos documentos de estrategia de reducción de la pobreza fallan en identificar al agua como una prioridad y, a menudo, no definen claramente objetivos de agua

³⁵ FORSLUND, A.; MALM RENÖFÄLT, B. M.; BARCHIESI, S. *et al.*, “Securing water for ecosystems and human well-being: The importance of environmental flows”, en *Swedish Water House Report*, 2009, nro. 24, Stockholm.

³⁶ UNITED NATIONS, *The Millennium Development Goal Report 2013*. 2013, New York.

al respecto³⁵. La Cumbre sobre el Desarrollo Sostenible de Johannesburgo en 2002 solicitó que los países elaboren planes de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), la que comprende un conjunto de procesos destinados mayormente a racionalizar la asignación de agua a todos los sectores, generalmente a escala nacional o de cuenca. En la práctica, desde un punto de vista sectorial y basado en el usuario, la GIRH raramente adoptó una visión de la sostenibilidad ecohidrológica como pilar de apoyo. Consecuentemente, la GIRH debe incluir a los ecosistemas como un usuario crítico y necesario o un beneficiario, si no se los reconoce como lo que son, la base misma del recurso, como es el caso de la noción de “Reserva Ecológica” en la Ley de Agua de Sudáfrica³⁷, por ejemplo. Este enfoque para la GIRH puede garantizar, mediante integración, cooperación y participación, un uso equitativo y sostenible de los recursos hídricos sin comprometer las necesidades a largo plazo de los ecosistemas. Esta necesaria transición debería expresarse, asimismo, con una reorientación desde tradicionales términos ingenieriles y económicos del agua (calidad o cantidad, infraestructura ‘verde’, etc.) hacia términos emergentes de sustentabilidad ecohidrológica (caudal ambiental y variables ecológicamente críticas, integridad ecológica, salud y viabilidad de especies, etc.)³¹.

En contraste con la GIRH, centrada hasta ahora principalmente en la asignación y aplicación, la Directiva Marco del Agua Europea (DMA) es un ejemplo de un enfoque moderno de legislación que contiene muchos de los principios clave de caudales ambientales. La DMA aborda tanto la cantidad como la calidad del agua, aguas superficiales y subterráneas, e incluye objetivos ambientales, económicos y sociales. Se aleja, así, en muchos aspectos de cómo se manejó históricamente el agua a nivel nacional o de cuenca en Europa y estimula una gestión del agua mejor y flexible. Por ejemplo, Suecia decidió atravesar una reforma legal para alinear su legislación de aguas con los requisitos de la DMA. Esta reforma requiere la renovación de licencias de la mayoría de las represas hidroeléctricas suecas para asegurar la inclusión de los caudales ambientales³⁸. Además, la DMA contempla mecanismos de gestión del agua que asumen que los ríos pueden ser ‘no estacionarios’³⁹, como la actualización periódica de las variables ecohidrológicas para permitir la revisión de los indicadores de eficiencia y sustentabilidad³¹.

³⁷ Esta norma determina que en los ríos debe establecerse una Reserva Ecológica de agua para mantener necesidades humanas básicas y el funcionamiento ecológico del ecosistema, con prioridad sobre los restantes usos.

³⁸ SWEDISH GOVERNMENT, Official reports, 2013. www.sou.gov.se/content/1/c6/22/53/51/e4fb5d62.pdf.

³⁹ La serie histórica de datos de caudal de la mayoría de los ríos muestra algún cambio brusco reciente o alguna tendencia creciente o decreciente (es decir, cambia el promedio o la variabilidad entre períodos de años, por lo que no son series ‘estacionarias’, como se asumió tradicionalmente). Esto debe tenerse en cuenta para aplicar adecuadamente los métodos de indicadores (como IHA y EFC), como recomiendan PUIG *et al.* (2016), y para una consistente estimación de caudales ambientales.

A menudo, la seguridad del agua humana se logra con poca consideración de las consecuencias ambientales y, aunque estas sean reconocidas, las disyuntivas entre las necesidades humanas y ambientales del agua están aumentando en frecuencia y amplitud. El concepto de caudales ambientales ha seguido evolucionando en respuesta a estos desafíos. Pahl-Wostl *et al.*⁴⁰ detectan una limitada transferencia de conocimientos, debido a la falta de investigación sobre la gobernanza de los caudales ambientales y a la prevalencia de análisis específicos de caso. La experiencia de aplicación muestra que los cuellos de botella críticos en el proceso de desarrollo e implementación de las políticas de caudales ambientales residen en la adecuación de las estructuras de gobernanza y en el diálogo entre científicos, responsables políticos, gestores del agua y usuarios.

Un informe comparativo elaborado recientemente por TNC y WWF⁴¹ concluye que las autoridades de gestión del agua y los gobiernos mundiales hicieron un progreso significativo y amplio en el desarrollo de políticas y leyes para reconocer los caudales ambientales. Sin embargo, en la mayoría de los casos este avance no se reflejó en su aplicación. Los principales retos identificados al respecto son la falta de voluntad política y de apoyo de los interesados directos, insuficientes recursos y capacidad, barreras institucionales y conflictos de interés.

Entre los desafíos críticos de gobernanza a ser abordados se incluye el establecimiento de objetivos estratégicos, la resolución de conflictos y negociación, la movilización de recursos, la identificación de objetivos operacionales e indicadores de seguimiento, y el desarrollo de un proceso de implementación adaptativa⁴⁰. Superar estos desafíos requiere contar con instituciones⁴⁰ apropiadas. Las instituciones (como leyes y normas sociales) determinan quien establece los objetivos, cómo se controlan y la evaluación de las consecuencias de los resultados.

Con respecto a los marcos normativos, la política ambiental durante mucho tiempo se ha basado en un enfoque de comando y control para prescribir objetivos ambientales. El cambio de paradigma hacia enfoques más integrados y el reconocimiento explícito de la complejidad y la incertidumbre demanda instituciones más flexibles y adaptables. Marcos normativos modernos, como la Directiva Europea Marco del Agua, prescinden de prescripciones estrechas de objetivos ambientales específicos y adoptan un enfoque más inclusivo e integrado, como, por ejemplo, la meta de un ‘buen estado’ para las aguas europeas⁴⁰.

⁴⁰ PAHL-WOSTL, C.; ARTHINGTON, A.; BOGARDI, J. *et al.*, “Environmental flows and water governance: managing sustainable water uses”, en *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, nro. 5(3), ps. 341-351.

⁴¹ LE QUESNE T.; KENDY, E. y WESTON, D., “The implementation challenge. Taking stock of government policies to protect and restore environmental flows”, en *The Nature Conservancy and WWF Report*, 2010.

Pahl-Wostl *et al.*⁴² muestran que los marcos jurídicos innovadores son una condición necesaria, pero no suficiente para abordar con eficacia los problemas de gestión relacionados con el agua. Los autores de ese primer análisis comparativo de cuencas fluviales, que abarcó sistemas complejos de gobernabilidad y de gestión del agua, identificaron a la implementación de políticas y, en algunos casos, a la falta de capacidad (conocimiento y recursos) como cuellos de botella fundamentales para la aplicación. Otro factor importante es la falta de eficacia general de las instituciones formales, ya que si la eficacia es baja, las leyes y planes de manejo pueden existir en el papel, pero no aplicarse en la práctica.

El debate sobre el cambio climático creó mayor conciencia sobre cómo una gama de servicios ecosistémicos, generalmente ignorados hasta ahora, puede mejorar la capacidad de adaptación y resiliencia de los sistemas socioecológicos. Pahl-Wostl *et al.*⁴⁰ sostienen que un cambio transformador hacia una mayor sostenibilidad puede apoyarse en organizar el diálogo de las partes interesadas alrededor del concepto de servicios ecosistémicos y la importancia de mantener ecosistemas funcionales para que los brinden. En la gobernanza del agua y los sistemas de gestión se ha puesto un énfasis abrumador en los servicios ecosistémicos de aprovisionamiento, mientras los servicios de regulación y soporte (por ejemplo, la capacidad de almacenamiento de paisajes ribereños para amortiguar tanto sequías como inundaciones) y los requisitos para su mantenimiento han permanecido mayormente ignorados. En consecuencia, la gobernanza y la gestión evolucionaron alrededor de explotar y garantizar el acceso a esos servicios de aprovisionamiento. Los sistemas de gobernanza ineficaces y la ignorancia de complejos mecanismos de regulación han llevado, a menudo, al uso ineficiente y a la sobreexplotación de algunos servicios, en detrimento de la integridad general de los sistemas ecológicos y sus consecuencias negativas a largo plazo para el bienestar humano². La definición de los objetivos ecológicos para la gestión de la cuenca fluvial constituye una elección social. En este sentido, el concepto de servicios ecosistémicos, un enfoque prometedor aún no completamente explorado en relación con caudales ambientales, facilitaría evaluar disyuntivas y sinergias entre diferentes servicios, así como implicancias de opciones, de modo cuantitativo y en un contexto espacial².

Considerando los avances recientes en la ciencia del caudal ambiental, la gobernanza y la gestión del agua, estos autores identifican la necesidad de un enfoque más sistemático para determinar requisitos de caudal ambiental y, en particular, incluyendo la interacción entre los sistemas social / político y ambiental. Consecuentemente, plantean el marco SUMHA basado en características eco-hidrológicas, socio-económicas, de gobernanza y gestión, ampliamente aplicable, integral, conceptual y analítico, con un sistema de clasificación

⁴² PAHL-WOSTL, C.; LEBEL, L.; KNIEPER, C. *et al.*, "From applying panaceas to mastering complexity: toward adaptive governance in river basins", en *Environmental Science and Policy*, 2012, nro. 23, ps. 24-34.

asociado para caudales ambientales⁴⁰. Este marco apoya el análisis científico y la aplicación práctica de caudales ambientales e implica la recopilación sistemática, el intercambio y la evaluación de experiencias en diferentes ecosistemas fluviales y sistemas de gobernanza alrededor del mundo. La introducción del concepto de servicios ecosistémicos en este marco genera conciencia sobre la importancia de las funciones de los ecosistemas para la resiliencia de los sistemas socio-ecológicos, apoya la negociación de disyuntivas y el desarrollo de estrategias para la implementación adaptativa. La experiencia en implementación de políticas de caudal ambiental revela la necesidad de un enfoque comprometido de investigación transdisciplinaria y donde la investigación se vincule estrechamente con la aplicación práctica de iniciativas.

6. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL

La selección de métodos de cálculo y la adopción de criterios para establecer caudales ambientales son dos aspectos claves, por su decisiva influencia en los resultados. En lugar de un panorama de los numerosos métodos que se han propuesto, aportaremos algunos comentarios generales sobre distintos enfoques. La visión presentada en secciones precedentes, enfocada en la relevancia de mantener en los ríos caudales variables y apropiados para permitir su funcionamiento y los consecuentes servicios ecosistémicos para beneficio de la humanidad, parece lejos de plasmarse en la práctica en muchos ríos. Aún se adoptan metodologías previas a todo el desarrollo del concepto de caudales ambientales, aplicando un valor fijo de caudal a ser mantenido como mínimo durante todo el año, el que, además, suele ser sumamente bajo⁴³.

Entre las técnicas y métodos más utilizados figuran los métodos hidrológicos “ecosistémicos”⁴⁴ y los modelos de simulación de hábitat. Los primeros se basan en el análisis de las características del régimen hidrológico natural, como factor clave en la organización del ecosistema fluvial, y formulan los caudales ambientales replicando en algún grado la magnitud, duración, frecuencia y momento de ocurrencia de los componentes funcionales más relevantes del régimen hidrológico. Por su parte, los modelos de simulación del hábitat se basan en relaciones cuantitativas entre los caudales circulantes, los parámetros físicos

⁴³ Por ejemplo, el valor denominado 7Q10, que corresponde al mínimo promedio de 7 días que tiene un período de retorno de 10 años (es decir, que solo cada 10 años sería probable registrar naturalmente un caudal tan bajo) se propuso en un inicio para dejar solo un poco de agua que amortiguara la contaminación; el Q95% (o Q90%), es decir, un valor tan bajo que resulta superado el 95% (90%) del tiempo en el río, que tampoco le deja casi nada de agua; o un porcentaje del caudal medio anual, donde el 10%Q medio (un caudal que es la décima parte del caudal promedio anual) es tan bajo que solo permite la breve subsistencia de algunos peces (obviamente, impidiendo su crecimiento o reproducción).

⁴⁴ El RVA es el más usado, sin embargo, los basados en los componentes del caudal ecológico (EFC), desarrollados más recientemente, permiten superar algunas dificultades de aplicación práctica del RVA (ver sección 7).

asociados que determinan el hábitat (como velocidad del agua, profundidad, sustrato) y los requerimientos del mismo de determinadas especies, usualmente un pez. La estimación del hábitat potencial útil para la especie seleccionada (o para un estadio, en especial) lleva a identificar el caudal mínimo correspondiente, lo que requiere luego algún método para derivar el régimen de caudales a aplicar.

Una estrategia que parece conveniente es aplicar métodos hidrológicos ecosistémicos para una estimación generalizada de todas las cuencas de un país (usando alguna de las estrategias de estimación propuestas para aquellas carencias de datos hidrológicos suficientes), en lo posible avanzando hacia un marco que incluya componentes socioeconómicos, y reservar otros que solo pueden aplicarse a tramos de río (como los métodos de hábitat) e implican más tiempo y costos, para tramos donde se requieran estudios más específicos.

Más allá de la metodología que resulte elegida, mediante rigurosos procesos de selección para cada país o cuenca, resulta muy oportuno tener presente los principios destacados por Sánchez Navarro y Martínez Fernández⁴⁵:

Principio de prevención y precaución: se basa en que existen claras evidencias científicas de los efectos ecológicos y geomorfológicos de la alteración del régimen de caudales sobre los ecosistemas y de los riesgos que estos suponen para sus comunidades biológicas, si bien los conocimientos científicos son insuficientes para establecer con certeza caudales ecológicos que respondan a esos objetivos ambientales. Para que prevalezca la preservación de los ecosistemas frente al riesgo de daños ambientales, los métodos y criterios preferibles serán los que proporcionen mejores garantías de conservación de los ecosistemas acuáticos.

Principio del mejor conocimiento disponible: los métodos y criterios empleados deben ser revisados críticamente por científicos expertos en sus respectivas disciplinas, basándose en supuestos razonables (como el paradigma de río natural) formulados a partir de estudios consistentes. Los datos, las técnicas analíticas y las conclusiones deben ser adecuadamente considerados de acuerdo con el conocimiento científico existente.

Principio de la contextualización hidrológica: se han sugerido²⁴ cuatro importantes principios sobre el rol del régimen hidrológico en la conservación de la biodiversidad: 1) El régimen de caudales es el principal determinante del hábitat físico en los ecosistemas acuáticos, condicionando la composición biológica; 2) Las estrategias vitales de las especies acuáticas han evolucionado principalmente en respuesta a sus regímenes hidrológicos naturales; 3) El mantenimiento de los patrones naturales de conectividad lateral y longitudinal es esencial para la viabilidad de las poblaciones de numerosas especies acuáticas

⁴⁵ SÁNCHEZ NAVARRO, R. y MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, J., *Los caudales ambientales: Diagnóstico y perspectivas*. Conferencia: Panel científico-técnico de seguimiento de la política de aguas. Fundación Nueva Cultura del Agua. Convenio Universidad de Sevilla-Ministerio de Medio Ambiente, 2007.

y 4) La alteración de los regímenes hidrológicos favorece la invasión y éxito de las especies introducidas.

Principio de los objetivos finalistas. Los métodos y criterios empleados en el cálculo de caudales ambientales deben ser evaluados en función de su efectividad para que se cumplan las funciones ecológicas, es decir, que se alcancen los objetivos ambientales para los que fueron diseñados.

Principios del enfoque ecosistémico: este enfoque se asume al definir el estado ecológico como expresión de la calidad de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos (como en la Directiva Marco). Se deben considerar los siguientes aspectos: 1) las propuestas de caudales ambientales deben formularse acorde al rango natural de variabilidad, evitando producir un desequilibrio más allá de su capacidad de recuperación; 2) debe considerarse la variabilidad como una característica intrínseca de los ecosistemas, por lo que la gestión debe adaptarse a estos cambios, destacando el papel central de un medio físico variable donde el régimen hidrológico es el factor clave y 3) Las propuestas de caudales ambientales deberán incluir adecuadamente todos los aspectos que caracterizan al régimen hidrológico.

7. UNA MIRADA DESDE LA DIRECTIVA MARCO EUROPEA Y LA NUEVA CULTURA DEL AGUA: EL CAUDAL AMBIENTAL EN ESPAÑA

La política del agua está atravesando un proceso de cambio profundo en toda Europa, ya que a los factores políticos, económicos y sociales generales que motivan esta transformación se añade la aplicación de la nueva Directiva Marco del Agua europea del año 2000.

El caso de España resulta especialmente interesante, por la conjunción de un alto grado de alteración fluvial, una legislación actual considerada una de las más avanzadas del mundo con respecto a los caudales ambientales, y una planificación y gestión del agua todavía muy alejada, en general, de esta nueva concepción⁴⁵. Este país europeo ocupa el tercer lugar en ese continente por la presión sobre sus recursos hídricos⁴⁶, la que llevó a una severa reducción de sus caudales fluviales, y es uno de los que evidencia mayor grado de regulación hídrica (1200 grandes represas) del mundo, ostentando el mayor número de represas por habitante. Sin embargo, en el ámbito normativo se evidencia un notable avance, probablemente por el empuje de la Nueva Cultura del Agua (originada en este país) y los mandatos generados por la Directiva Marco del Agua Europea. A continuación presentaremos aspectos relevantes, por su interés para el debate general de caudales ambientales, seleccionados de la valoración, realizada por Sánchez Navarro y Martínez Fernández⁴⁵, de avances y dificultades en

⁴⁶ EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (EEA), "Europe's water: An indicator-based assessment", Copenhagen, European Environmental Agency, 2003.

el establecimiento del régimen de caudales ambientales en el ámbito normativo, de planificación y de gestión.

El marco normativo que configuran la Directiva Marco de Aguas, la reforma de la Ley de Aguas y el Reglamento de Planificación Hidrológica constituye un avance muy importante en relación con el establecimiento de un régimen de caudales ambientales que responda realmente al mantenimiento de la estructura, funcionalidad y dinámica fluvial y de los hábitats y biodiversidad asociada.

El primer aspecto destacable es la concepción totalmente distinta de las denominadas demandas ambientales, introducida, por primera vez, en la reforma de la Ley de Aguas de 1999. Allí se establece (art. 59 punto 7) que las demandas ambientales tienen la consideración de restricciones previas al sistema de explotación y, por lo tanto, a la cuantificación y asignación de los recursos disponibles. Según dicha normativa, los caudales ambientales operan con carácter preferente al resto de los usos, con la única excepción del abastecimiento a poblaciones. Esta concepción está alineada con la Directiva Marco de Aguas, que especifica que el régimen de caudales constituye uno de los aspectos básicos para alcanzar y mantener el Buen Estado Ecológico, y que solo los recursos disponibles tras haber considerado las demandas ambientales, como una restricción previa, podrán ser objeto de asignación y reserva para los usos existentes y previsibles. Además, conforme a esta Directiva, es necesario que el régimen hidrológico establecido asegure que no cambien de clase los indicadores biológicos y físico-químicos de calidad propios del Buen Estado Ecológico.

La reforma de la Ley de Aguas especifica que los caudales ecológicos se fijarán en los Planes Hidrológicos de cuenca y que, para su establecimiento, los organismos de cuenca realizarán estudios específicos para cada tramo de río. Por lo tanto, según dicha ley, no resultan aceptables valores fijos de caudales mínimos establecidos de forma arbitraria, como los que figuran en los planes hidrológicos de cuenca todavía vigentes.

El Reglamento de la Planificación Hidrológica de 2007 también establece (art. 18) que el régimen de caudales ambientales es el “que permite mantener de forma sostenible la funcionalidad y estructura de los ecosistemas acuáticos y de los sistemas terrestres asociados, contribuyendo a alcanzar el buen estado o potencial ecológico en ríos o aguas de transición” y que este régimen de caudales ambientales ha de ser establecido por estudios específicos para cada tramo de río. En caso de sequía prolongada, este Reglamento establece (apartado 18.4) que “podrá aplicarse un régimen de caudales menos exigente, siempre que se cumplan las condiciones que establece el art. 38 sobre deterioro temporal del estado de las masas de agua. Esta excepción no se aplicará en las zonas incluidas en la red Natura 2000 o en la Lista de humedales de importancia internacional de acuerdo con el Convenio de Ramsar. En estas zonas se considerará prioritario el mantenimiento del régimen de caudales ecológicos, aunque se aplicará la regla sobre supremacía del uso para abastecimiento de poblaciones”.

Otras normativas sectoriales avanzan un poco más en la definición del régimen de caudales ambientales. Así, en el Plan Integral de Protección del Delta del Ebro, se establece la necesidad de definir un régimen de caudales ambientales del tramo inferior de este río que “permita el desarrollo de las funciones ecológicas del río, el delta y el ecosistema marino próximo”.

En cuanto a la planificación, los Planes Hidrológicos de Cuenca fueron elaborados y aprobados en el marco de una norma previa, donde no se definían los caudales ambientales (ley 29/1985 de Aguas). Sin embargo, aunque casi todos los organismos de cuenca han cumplido en desarrollar estudios complementarios para calcular sus caudales ambientales, los resultados de estos estudios específicos generalmente no se han incorporado aún a los planes de cuenca, incumpliendo de varios modos lo establecido con la reforma de la Ley de Aguas de 1999. En contraste, en algunas cuencas, como las cuencas internas de Cataluña, se ha procedido a su incorporación en los planes a través de las normas de explotación o de los propios mecanismos de desarrollo del Plan.

Los métodos de cálculo o criterios establecidos para definir estos caudales, en general, se redujeron a aproximaciones minimalistas, basadas en reglas ya superadas de otros países (Francia, Estados Unidos) o en aproximaciones más o menos empíricas desarrolladas en la respectiva cuenca. Si bien en algunos planes de cuenca aún aparece el concepto de caudal de dilución (vinculando el caudal mínimo a un determinado nivel de la calidad de las aguas), por el contrario, en los de algunas otras cuencas existe una referencia expresa a que los caudales ambientales no deben ser considerados como caudales de dilución, llegando incluso a establecer claramente que “el problema de la contaminación debe atacarse a nivel de la fuente productora, exigiendo que las aguas procedentes de vertidos estén en condiciones de integrarse en el cauce sin provocar demandas de dilución”.

Más sorprendente todavía es la referencia en algunos planes a valores absolutos de caudales ambientales máximos (es decir, no se permite que el río transporte más de una determinada cantidad de agua). Esta distorsión para intentar evitar un potencial conflicto con el resto de los usuarios se detecta en cuencas donde las demandas representan una fuerte presión para los ríos, estableciéndose, por ejemplo, que el cumplimiento de los caudales ambientales “queda condicionado a la compatibilidad con los usos existentes y al régimen de disponibilidades” o que se respetarán los caudales mínimos “siempre que no se afecte a las garantías de otros usos preestablecidos”. Esto vulnera lo establecido en la reforma de la Ley de Aguas y evidencia que las demandas ambientales tienen un carácter más virtual que real en cuencas donde los consumos de agua superan los recursos renovables disponibles, lo que, en definitiva, termina ocasionando mayores conflictos.

Los autores de esta evaluación crítica indican que algunos de los estudios del régimen de caudales ecológicos contienen insuficiencias metodológicas importantes y no se ajustan a los objetivos y especificaciones del marco normativo

vigente. Un problema metodológico importante detectado en la mayoría de las cuencas se centra en los periodos seleccionados de las series hidrológicas de caudal. Con alguna excepción, como las cuencas internas de Cataluña, los recursos hídricos se han calculado utilizando series hidrológicas largas, aunque es sabido que las precipitaciones y los caudales se redujeron en ese país en los últimos 25 años. Esto sobredimensiona la determinación de recursos hídricos disponibles sobre los cuales se calculan los caudales ecológicos, lo que se agrava con una incongruencia metodológica adicional cuando se usa el periodo reciente (más seco) para establecer concretamente el régimen de caudales ambientales. Consecuentemente, se reclama la necesidad de coherencia estricta en el periodo seleccionado de la serie hidrológica de caudales para todo el procedimiento y se recomienda considerar como referencia el periodo reciente para que refleje las condiciones presentes.

Por último, en el ámbito de la gestión real de los ríos es probablemente donde menos se ha avanzado en el mantenimiento de un adecuado régimen de caudales ambientales, a pesar de los avances normativos descritos y de los estudios específicos realizados en la mayoría de las cuencas. La situación de presión y amenaza crecientes ha continuado, a pesar de los años transcurridos desde la aprobación de la Directiva Marco del Agua, cuyo principio de no deterioro desde diciembre del año 2000 protege a los ríos de nuevas concesiones que puedan afectar el estado ecológico de sus aguas. Cualquier nuevo aprovechamiento o regulación debería pasar previamente por la determinación del régimen de caudales ambientales y por estudios específicos que evalúen la compatibilidad de estas nuevas concesiones o regulaciones con el mantenimiento del régimen de caudales ambientales, pero esto se sigue incumpliendo sistemáticamente en la generalidad de las cuencas hidrológicas⁴⁷. En este sentido, resulta alentador que en el ámbito judicial empiece a reconocerse la aplicación de la normativa específica. En 2005 el Tribunal Supremo por primera vez emitió una sentencia sobre la necesidad de que los concesionarios de embalses o centrales hidroeléctricas mantengan los caudales ecológicos de los ríos, indicando que los caudales mínimos impuestos por la Confederación Hidrográfica del Tajo son “claramente insuficientes” y “no se fundamentan en criterios técnicos o científicos”.

Entre las propuestas que siguen al análisis, los autores indican la necesidad de incorporar en la normativa especificaciones sobre el concepto de caudales ambientales, principios para la selección de métodos de cálculo y el proceso para su incorporación a los planes de cuenca. Proponen avanzar en la declaración de ríos protegidos con fines ambientales, ya que el marco normativo actual contempla esta opción (Ley del Plan Hidrológico Nacional y Ley de Aguas) estableciendo la posibilidad de reservas hidrológicas de ciertos ríos, tramos fluviales, acuíferos o masas de agua para su conservación en estado natural, lo

⁴⁷ BRUFAO CURIEL, P., “Breves apuntes sobre los ríos protegidos”, AEMS-RIOS CON VIDA, 2006. [En línea] www.riosconvida.org [Consulta: marzo de 2016].

que podrá implicar la prohibición de otorgar autorizaciones o concesiones. Solo registraron un caso de río protegido de concesiones en España (Estuario del Río Sor, Cuenca Galicia-Costa).

Con respecto a la planificación, la conservación a largo plazo de todo el ecosistema depende de la adopción de un marco conceptual apropiado para la determinación de los caudales ambientales. Las buenas prácticas en la determinación de los caudales ambientales deberían considerar los siguientes principios: de prevención y precaución, del mejor conocimiento científico disponible, de la contextualización hidrológica, de los objetivos finalistas y del enfoque ecosistémico (ya expuestos en la sección 7).

Es fundamental llevar a cabo un seguimiento de los efectos prácticos del régimen de caudales establecido sobre el estado ecológico del ecosistema fluvial, aplicando el principio de gestión adaptativa, de forma que sea posible realizar correcciones a dicho régimen de caudales y garantizar el cumplimiento real de sus objetivos. Esta es la mejor validación posible, dada la complejidad de funcionamiento de los sistemas naturales.

La puesta en práctica de los caudales ambientales debería incluir la participación activa de los distintos actores y la formulación de escenarios que relacionen los regímenes de caudales con el logro de objetivos ambientales concretos y los efectos sobre la satisfacción del resto de las demandas. Se deben evaluar los efectos ambientales de toda nueva concesión o autorización y, en caso de que no exista aún un régimen de caudales establecido a partir de estudios específicos, atendiendo al principio de precaución debería establecerse una moratoria en el otorgamiento de nuevas concesiones, con el fin de evitar nuevas hipotecas que lastren o imposibiliten el establecimiento de los caudales ambientales más adecuados.

Finalmente, la estructura y el funcionamiento de los organismos de cuenca resulta clave, requiriendo usualmente cambios importantes, como incrementar la cohesión entre las distintas unidades administrativas, contar con personal técnico multidisciplinario y especializado en la temática. Asimismo deben ampliarse y reforzarse los órganos de participación pública.

CONCLUSIONES

La incorporación de caudales ambientales en marcos normativos de países sudamericanos es dispar, encontrándose, en general, poco desarrollada. Un análisis en profundidad sobre el marco normativo y los métodos de estimación de caudales ambientales en países de Sud América amerita un trabajo con ese objetivo específico.

En la Argentina se realizaron dos talleres en 2014 y 2015 sobre caudales ambientales, incluyendo presentaciones, por ejemplo, sobre un análisis del caso del Río Atuel en La Pampa, con ponderación de aspectos ecológicos y socioeconómicos en distintos escenarios; la aplicación de un método de evaluación

de hábitat de un pez en un río de Córdoba; el manejo concertado mediante el Comité de Cuenca de una situación de escasez de agua en el Río Colorado; y principios normativos a considerar para la adopción del caudal ambiental en la legislación nacional.

La metodología a considerar depende mucho del tipo de ríos que caracterizan a una región. América del Sur se distingue por sus grandes sistemas fluviales, que le confieren alto potencial estratégico. Los grandes ríos están especialmente expuestos a problemas debido a sus múltiples usos, a menudo con objetivos en conflicto. El aumento considerable en los últimos años de presiones e impactos sobre los grandes ríos, incluyendo sus cuencas y afluentes, avala la urgente necesidad de acciones al respecto. A fin de proporcionar un foro científico para discutir beneficios y amenazas se desarrolló en Viena (Austria) en 2011 la 1ª Conferencia Internacional sobre el Estado y el Futuro de los Grandes Ríos del Mundo. Los participantes de esta Conferencia (más de 450, procedentes de 73 países, representando a todos los continentes, grandes ríos y campos temáticos pertinentes) debatieron y aprobaron la denominada “Declaración de Viena”. Esta Declaración identificó que resulta necesario para los grandes ríos del mundo: analizar el estado actual de estos ríos, las demandas en conflicto y el desarrollo fluvial futuro, incluyendo el impacto a mediano y largo plazo del cambio climático; conformar un foro mundial que facilite la amplia discusión informada de asuntos claves relacionados con la investigación y gestión de grandes ríos; promover la conservación de los pocos grandes ríos más naturales aún remanentes, así como la gestión sostenible o rehabilitación de aquellos más impactados; e incluir la transferencia de conocimientos a los tomadores de decisión y a la población. La presentación de esta Declaración en el 21º Consejo Intergubernamental del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO originó la “Iniciativa de Grandes Ríos del Mundo”, aprobada oficialmente en París el 20 de junio de 2014.

Teniendo en cuenta el actual auge sin precedentes en la construcción de represas hidroeléctricas en las cuencas de los ríos con mayor biodiversidad del mundo (Amazonas, Congo y Mekong), Winemiller *et al*⁴⁸ señalan que estos proyectos a menudo subestiman los efectos negativos sobre la biodiversidad y las pesquerías. Por lo tanto, estos autores afirman que se requieren análisis a escala de cuenca, considerando impactos acumulativos de múltiples represas y del cambio climático.

El Río Paraná es considerado uno de los 10 megaríos del mundo y representa un eje significativo de biodiversidad, población y actividades productivas. El subsistema Paraguay-Paraná representa un valioso y extenso eje de continuidad funcional de humedales fluviales desde el Pantanal hasta el Delta. En cambio, la Alta Cuenca del Río Paraná ocupa el tercer lugar mundial por la

⁴⁸ WINEMILLER, K. O.; MCINTYRE, P. B.; CASTELLO, L. *et al.*, “Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong”, *Science*, 2016, nro. 351, ps. 128-129.

capacidad de infraestructura instalada para generación hidroeléctrica. Recientemente, concretamos una contribución científica sustantiva, en conjunto con el hidrólogo responsable del Sistema de Alerta Hidrológica de la Cuenca del Plata⁴⁹. En ese trabajo evaluamos las alteraciones en todos los componentes del régimen hidrológico del Río Paraná Inferior, mediante el análisis de datos diarios de caudal a lo largo de más de una centuria, aplicando indicadores, como IHA y EFC. Las principales alteraciones identificadas, luego del cambio hidrológico brusco de principios de los 1970s, fueron consistentes con la regulación del caudal a escala mensual y diaria por las numerosas represas, ubicadas principalmente en la Alta Cuenca del Río Paraná, las que, en conjunto, acumulan un volumen total de agua embalsada que equivale a la mitad del caudal anual del río, es decir, con moderado a alto potencial de regulación.

Por último, cabe enfatizar que esta temática, relativamente poco conocida y difundida en el país y en la región, no merece quedar anclada meramente en la retórica, ni que su implementación sea conducida por atajos de visiones simplistas, o incluso sesgadas por falta de conocimiento, desaprovechando los grandes esfuerzos para su avance ya realizados en distintas partes del mundo. Consecuentemente, esperamos que este artículo contribuya a transmitir conceptos y criterios actualizados sobre este relevante tema, candidato a convertirse en un eje de la gestión integrada de recursos hídricos y para el que se ha llegado a proponer un marco de convergencia de aspectos ecohidrológicos, socio-económicos, de gobernanza y gestión. Aspiramos, así, a que esta visión facilite una responsable y apropiada consideración de los distintos aspectos de su complejidad para encaminarse hacia el logro de sus trascendentes objetivos ecológicos y sociales.

BIBLIOGRAFÍA

- ARTHINGTON, Á. H.; NAIMAN, R. J.; MCCLAIN, M. E. *et al.*, “Preserving the biodiversity and ecological services of rivers: new challenges and research opportunities”, en *Freshwater Biology*, 2010, nro. 55(1), ps. 1-16.
- BARON J. S.; POFF, N. L.; ANGERMEIER, P. L. *et al.*, “Sustaining healthy freshwater ecosystems”, en *Issues in Ecology*, 2004, nro. 127, ps. 52-58 y 68-75.
- BERGA, L.; BUIL, J. M.; BOFILL, E. *et al.* (eds.), *Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the 21st Century*, Two Volume Set: Proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century, 22nd International Congress on Large Dams (ICOLD), Barcelona, Spain, 18 June 2006. CRC Press.

⁴⁹ PUIG, A.; OLGUÍN, H. y BORÚS, J. A., “Recent changes (1973-2014 versus 1903-1972) in the flow regime of the Lower Paraná River and current fluvial pollution warnings in its Delta Biosphere Reserve”, en *Environmental Science and Pollution Research*, “Pollution Issues in Large Rivers” Special Issue, 2016, Doi: 10.1007/s11356-016-6501-z.

- BRUFAO CURIEL, P., “Breves apuntes sobre los ríos protegidos”, AEMS-RIOS CON VIDA, 2006. www.riosconvida.org.
- BUNN S. E. y ARTHINGTON, A. H., “Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity”, en *Environmental Management*, 2002, nro. 30 (1), ps. 492-507.
- CARLISLE D. M.; WOLOCK, D. M. y MEADOR, M. R., “Alteration of streamflow magnitudes and potential ecological consequences: a multiregional assessment”, en *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, nro. 9, ps. 264-270.
- CRUTZEN, P. J. y STOERMER, E. F., “The “Anthropocene”, en *Global Change Newsletter*, 2000, nro. 41, ps. 17-18.
- EEA Europe’s water: An indicator-based assessment. European Environmental Agency. Copenhagen, 2003.
- FORSLUND, A.; MALM RENÖFÄLT, B. M.; BARCHIESI, S. *et al.*, “Securing water for ecosystems and human well-being: The importance of environmental flows”, en *Swedish Water House Report*, 2009, nro. 24, Estocolmo.
- HANASAKI, N.; KANAE, S. y OKI, T., “A reservoir operation scheme for global river routing models”, en *Journal of Hydrology*, 2006, nro. 327(1), ps. 22-41.
- KAREIVA P. M., “Dam choices: Analyses for multiple needs”, en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, nro. 109, ps. 5553-5554.
- LEHNER, B.; REIDY LIERMANN, C.; REVENGA, C. *et al.*, “High-resolution mapping of the world’s reservoirs and dams for sustainable river-flow management”, en *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, nro. 9(9), ps. 494-502.
- LE QUESNE, T.; KENDY, E. y WESTON, D., “The implementation challenge. Taking stock of government policies to protect and restore environmental flows”, en *The Nature Conservancy and WWF Report*, 2010.
http://awsassets.panda.org/downloads/the_implementation_challenge.pdf
- LIMA IBT, F.; RAMOS, M.; BAMBACE, L. *et al.*, “Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective”, en *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2008, nro. 13, ps. 193-206.
- MATHEWS, R. y RICHTER, B. D., “Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting”, en *Journal of American Water Resources As*, 2007, nro. 43, ps. 1400-1413.
- MATTHEWS, J. H.; FORSLUND, A.; MCCLAIN, M. E. *et al.*, “More than the fish: environmental flows for good policy and governance, poverty alleviation and climate adaptation”, en *Aquatic Procedia*, 2014, nro. 2, ps. 16-23.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment), “Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis”, Washington, DC, World Resources Institute, 2005.

- NAIMAN, R. J.; LATTERELL, J. J.; PETTIT, N. E. *et al.*, “Flow variability and the biophysical vitality of river systems”, en *Comptes Rendus Geoscience*, 2008, nro. 340(9), ps. 629-664.
- NILSSON C.; REIDY, C. A.; DYNESIUS, M. *et al.*, “Fragmentation and flow regulation of the world’s large river systems”, en *Science*, 2005, nro. 308, ps. 405-408.
- PAHL-WOSTL C.; LEBEL, L.; KNIEPER, C. *et al.*, “From applying panaceas to mastering complexity: toward adaptive governance in river basins”, en *Environmental Science and Policy*, 2012, nro. 23, ps. 24-34.
- PAHL-WOSTL, C.; ARTHINGTON, A.; BOGARDI, J. *et al.*, “Environmental flows and water governance: managing sustainable water uses”, en *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, nro. 5(3), ps. 341-351.
- POFF N. L.; ALLAN, J. D.; BAIN, M. B. *et al.*, “The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration”, en *BioScience*, 1997, nro. 47, ps. 769-784.
- POFF, N. L.; BLEDSOE, B. P. y CUHACIYAN, C. O., “Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems”, en *Geomorphology*, 2006, nro. 79(3), ps. 264-285.
- POFF, N. L.; RICHTER, B. D.; ARTHINGTON, A. H. *et al.*, “The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards”, en *Freshwater Biology*, 2010, nro. 55, ps. 147-170.
- POFF, N. L. y MATTHEWS, J. H., “Environmental flows in the Anthropocene: past progress and future prospects”, en *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, nro. 5(6), ps. 667-675.
- POFF, N. L. y WARD, J. V., “Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns”, en *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, nro. 46(10), ps. 1805-1818.
- PUIG, A., “Raising environmental awareness on aquatic pollution in the Matanza-Riachuelo River basin”, Argentina: 422-435, en SCARPATI, O. E. y JONES, J. A. A. (eds.), *Environmental change and rational water use*, Buenos Aires, Orientación Gráfica Editora, 2007, 458 ps.
- PUIG, A. y OLGUÍN, H., “Cursos fluviales bonaerenses: estrés químico y ecohidrología”, ps: 55-67. “Watercourses in Buenos Aires: chemical stress and ecohydrology”, ps. 187-199, en CAPALDO, G. (ed.), *Sinergias Ambientales entre las Aguas Continentales y las Marinas*, edición bilingüe, Buenos Aires, Editorial Mare Magnum (WCS-CONICET), 2006, 256 ps.
- “Agua, ecosistemas y sustentabilidad: del desafío global al Delta del Paraná y su Reserva de Biósfera”, Capítulo IV, Parte II. Agua, Ecología y Salud, ps. 83-104. Extended Abstract: 535-538, en CAPALDO, G. (ed.), *Gobernanza y Manejo Sustentable del Agua*, Serie Sinergias Ambien-

- tales, edición bilingüe, Buenos Aires, Editorial MNEMOSYNE, 2011, 702 ps.
- PUIG, A.; OLGUÍN SALINAS, H. F. y BORÚS, J. A., “Recent changes (1973-2014 versus 1903-1972) in the flow regime of the Lower Paraná River and current fluvial pollution warnings in its Delta Biosphere Reserve”, en *Environmental Science and Pollution Research*, “Pollution Issues in Large Rivers” *Special Issue*, 2016, doi: 10.1007/s11356-016-6501-z.
- RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; POWELL, J. *et al.*, “A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems”, en *Conservation Biology*, 1996, nro. 10, ps. 1163-1174.
- RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; WIGINGTON, R. *et al.*, “How much water does a river need?” en *Freshwater Biology*, 1997, nro. 37, ps. 231-249.
- SÁNCHEZ NAVARRO, R. y MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, J., *Los caudales ambientales: Diagnóstico y perspectivas*. Conferencia: Panel científico-técnico de seguimiento de la política de aguas. Fundación Nueva Cultura del Agua. Convenio Universidad de Sevilla-Ministerio de Medio Ambiente, 2007.
- SCUDDER, T. T., *The Future of Large Dams: Dealing with Social, Environmental, Institutional and Political Costs*, Taylor & Francis, 2012.
- SHIKLOMANOV, I. A., “Appraisal and assessment of world water resources” en *Water International*, 2000, nro. 25, ps. 11-32.
- SWEDISH GOVERNMENT (Swedish Government official reports) 2013. www.sou.gov.se/content/1/c6/22/53/51/e4fb5d62.pdf.
- SYVITSKI, J. y HIGGINS, S., “Going under: The world’s sinking deltas”, en *New Scientist*, 2012, nro. 216(2893), ps. 40-43.
- THIESSEN, H.; BRKLACICH, M.; BREULMANN, G. *et al.* (eds.), *Communicating Global Change Science to Society. An Assessment and Case Studies*. SCOPE 68. Island Press, Washington, DC, 2007, 215 ps.
- TNC (The Nature Conservancy), “User’s manual for the Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) software version 7.1”, 2011, <http://conserveonline.org/workspaces/iha>.
- UNITED NATIONS, *The Millennium Development Goal Report 2013*, Nueva York, 2013.
- WCD (World Commission on Dams), *Dams and Development: A New Framework for Decision-making: the Report of the World Commission on Dams*, Earthscan, 2000.
- WINEMILLER, K. O.; MCINTYRE, P. B.; CASTELLO, L. *et al.*, “Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong”, *Science*, 2016, nro. 351, ps. 128-129.

Tabla 1. Número de represas y volumen total de agua embalsada en cuencas fluviales seleccionadas, de acuerdo a información de la base GRanD (Lehner et al. 2011, Apéndice)

Cuenca fluvial	Número de represas	Vol. de agua embalsada (km ³)
Nilo	9	376
Mississippi	707	330
Paraná	71	315
Zambezi	59	258
Éufrates-Tigris	33	229
Volga	17	195
Yangtzé	371	193
Ganges	81	82
Indus	25	49
Río Grande	35	30
Murray-Darling	55	23
Danubio	184	22

Figura 1. Grandes embalses en el mundo y en América del Sur:

a) Distribución mundial, por país, del número de grandes embalses, de acuerdo a información incluida en la base Grand (Lehner *et al.* 2011),

b) Tramos de ríos potencialmente afectados por la regulación aguas arriba debida a embalses en América del Sur, de acuerdo a información de Grand (Lehner *et al.* 2011, Apéndice),

c) Ubicación de represas hidroeléctricas propuestas para América del Sur, según los proyectos del ministerio de energía y/o la agencia de planificación de cada país compilados entre 2009 y 2011. Los datos originales provienen de bases de datos y de planes estratégicos oficiales de energía y fueron compilados por Paulo Petry, de The Nature Conservancy (Kareiva 2012)



