

Evaluación ecohidráulica multidimensional del hábitat acuático en la conservación de hidrosistemas fluviales*

Multidimensional Ecohydraulic Evaluation of Aquatic Habitats in the Preservation of Fluvial Hydrosystems*

Avaliação ecohidráulica multidimensional do hábitat aquático na conservação de hidrosistemas fluviais*

*Juan Manuel Díez Hernández***

*Nelson Obregón Neira****

* Fecha de recepción: 24 de junio de 2008. Fecha de aceptación para publicación: 10 de septiembre de 2008. Este artículo se deriva de la investigación realizada en el marco de una estancia posdoctoral del primer autor en la Universidad Nacional de Colombia, en 2007, financiada por la Agencia Española de Cooperación.

* Date of submission: June 24, 2008. Date of acceptance for publication: September 10, 2008. This article stems from post-doctoral research work carried out by the first author at Universidad Nacional de Colombia, in 2007, financed by the Agencia Española de Cooperación (Spanish Cooperation Agency).

* Data de recepção: 24 de junho de 2008. Data de aceitação para publicação: 10 de setembro de 2008. Este artigo deriva-se da pesquisa realizada no marco de uma instância pós-doutoral do primeiro autor da Universidade Nacional da Colômbia em 2007, financiada pela Agência Espanhola de Cooperação.

** Ingeniero forestal, Universidad de Lérida, España. PhD en Ecohidráulica, Universidad de Valladolid, España. Post-PhD, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Profesor del Grupo de Hidráulica e Hidrología, Escuela Superior de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid. Correo electrónico: jmdiez@iaf.uva.es.

*** Ingeniero civil, Universidad Distrital Francisco de Paula Santander, Bogotá, Colombia. PhD en Hidrología, University of California at David, Estados Unidos. Post-PhD University of California at Davis. Profesor titular de la Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: nobregon@javeriana.edu.co.

Resumen

Este trabajo destaca la aptitud de la ecohidráulica para mejorar la comprensión de la dinámica ecosistémica fluvial y de la evaluación del hábitat acuático en el contexto de la conservación y restauración de los hidrosistemas lóticos. El marco analítico local con alta resolución empleado en ecohidráulica para describir las condiciones del microhábitat fluvial, y su complementariedad con las técnicas ecohidrológicas, posibilita las recomendaciones defendibles, que serán cada vez más escrutadas en los proyectos de recuperación fluvial. En el artículo se describe el procedimiento operativo de la evaluación ecohidráulica del microhábitat fluvial a escala espacial y temporal, cuyos resultados se interpretan en los estudios de caudales ecológicos; así como la mejora del hábitat fluvial y restauración de riberas. El protocolo de caracterización fluvial multidimensional que se describe posibilita el modelamiento detallado del ambiente microhidráulico que perciben los organismos acuáticos y que condiciona su comportamiento. Se pone de relieve el valioso potencial de las herramientas científicas que ofrece la ecohidráulica para el análisis avanzado del ecosistema fluvial y el diseño ingenieril de medidas de conservación y recuperación ambiental para los ríos del país. El índice ecohidráulico que evalúa la calidad global del microhábitat acuático puede incorporar eficazmente las consideraciones ecológicas en la gestión de los recursos hídricos y en el diseño de intervenciones en el medio fluvial. La nueva frontera interdisciplinar de la hidráulica fluvial que supone la ecohidráulica aporta nuevos retos para la investigación hidrocientífica, como son la incorporación adecuada de los criterios biológicos y la interpretación de los resultados en corrientes con alta biodiversidad.

Palabras clave

Ecohidráulica, hábitat acuático, 2D/3D programa.

Abstract

This paper highlights the ability of ecohydraulics to improve the understanding of the fluvial ecosystem dynamics and the assessment of the aquatic habitat in the context of the conservation and restoration of lotic hydrosystems. The high-resolution analytical framework used in ecohydraulics to describe the conditions of the fluvial microhabitat, and its complementarity with ecohydrological techniques, suggests the justifiable recommendations that will be more completely scrutinized in the river restoration projects. The paper summarizes the procedure for the ecohydraulic evaluation of the fluvial microhabitat using temporal and spatial scales, whose results are interpreted in studies of instream flows, fluvial habitat enhancement, and river restoration. The described protocol for the multidimensional fluvial characterization permits the detailed modeling of the micro-hydraulic environment that is perceived by aquatic organisms and conditions their behavior. This work summarizes the valuable potential of the scientific tools that ecohydraulics offers for the advanced analysis of the fluvial ecosystem and the design of measures for the conservation and rehabilitation of Colombian rivers. The ecohydraulic index that assesses the global quality of the aquatic microhabitat can efficiently incorporate the ecological considerations in water resource management and in the design of intervention in the rivers. The new interdisciplinary frontier of fluvial hydraulics that is constituted by ecohydraulics provides new challenges for hydro-scientific research, as the convenient incorporation of biological criteria and the resulting interpretation in streams with high biodiversity.

Key words

Ecohydraulics, aquatic habitat, 2D/3D program.

Resumo

Este trabalho destaca a aptidão da ecohidráulica para melhorar a compreensão da dinâmica ecossistémica fluvial e da avaliação do hábitat aquático no contexto da conservação e restauração dos hidrosistemas lóticos. O marco analítico local com alta resolução usado na ecohidráulica para descrever as condições do microhábitat fluvial, e sua complementação com as técnicas ecohidrológicas, possibilita as recomendações defendíveis, que serão cada vez mais escrutadas nos projetos de recuperação fluvial. O artigo descreve o procedimento operativo da avaliação ecohidráulica do microhábitat fluvial na escala espacial e temporal, cujos resultados são interpretados nos estudos de caudais ecológicos; assim como na melhora do hábitat fluvial e restauração de riberas. O protocolo da caracterização fluvial multidimensional que se descreve, possibilita modelar detalhadamente o ambiente microhidráulico que percebem os organismos aquáticos e que condiciona seu comportamento. Ilustra-se o valioso potencial das ferramentas científicas que oferece a ecohidráulica para a análise avançada do ecossistema fluvial e o desenho da engenharia de medidas de conservação e recuperação ambiental para os rios do país. O índice ecohidráulico que avalia a qualidade global do microhábitat aquático pode incorporar eficazmente as considerações ecológicas na gestão dos recursos hídricos e no desenho de intervenções no médio fluvial. A nova fronteira interdisciplinar da hidráulica fluvial que supõe a ecohidráulica, aporta novos desafios para a pesquisa hidrocientífica, como são a incorporação adequada dos critérios biológicos e a interpretação dos resultados em correntes com alta biodiversidade.

Palavras dicas

Ecohidráulica, hábitat aquático, 2D/3D programa.

1. Nuevos paradigmas en la comprensión ecosistémica de un río

Las alteraciones significativas de la calidad ambiental de las corrientes fluviales provocadas por las intervenciones humanas y el cambio climático son conocidas ampliamente (Mueller y Marsh, 2002; Dudgeon *et al.*, 2006), y amenazan la provisión de bienes ecológicos y servicios que prestan estos entornos acuáticos. Muchos países han comenzado a invertir recursos financieros y humanos para desarrollar herramientas científicas e ingenieriles dirigidas a la conservación y recuperación de los ecosistemas acuáticos continentales. Este esfuerzo investigador ha promovido novedosos conceptos y métodos analíticos integrados en dos disciplinas complementarias de la hidrobiología: la ecohidrología y la ecohidráulica.

Los paradigmas de estas recientes perspectivas rigen la comprensión actual de la ecología de los hidrosistemas lóticos y lénticos, que difieren en cuanto al dominio hidrológico estudiado, la escala espacial y temporal de aplicación y las aproximaciones analíticas (Poff, 2004). La utilización coordinada de las respectivas facetas ecológicas de la hidráulica y de la hidrología enriquece el conocimiento y la representación cuantitativa de las relaciones entre el movimiento del agua en una cuenca, el hábitat físico-químico, la biodiversidad y la funcionalidad del ecosistema acuático. El entendimiento mejorado de los procesos y condiciones que determinan la estructura, composición y funcionamiento de los ecosistemas posibilita formular directrices científicas más consistentes para una gestión de los recursos hídricos verdaderamente integral.

La ecohidrología considera las interrelaciones funcionales entre la hidrología, los procesos involucrados en un ecosistema y su biota, dirigidas al manejo equilibrado del ecosistema. Los ecohidrólogos conciben una regulación del hidrosistema dual, utilizando simultáneamente los procesos ecológicos e hidrológicos, para salvaguardar su integridad ecológica global en unas condiciones alteradas por el hombre (Zalewski, 2006).

En el ámbito fluvial, se analiza holísticamente el efecto de la alteración del régimen de caudales en los procesos y condiciones ecosistémicas, en un contexto donde las respuestas de los organismos a las condiciones abióticas varían dinámicamente en el espacio y en el tiempo (Poff, 2004). Los dos procedimientos principales calculan un conjunto de índices hidrológicos que representan las características de la variabilidad de caudales con significación biológica: (1) los indicadores de alteración hidrológica (Nature Conservancy, 2007) y (2) la evaluación de la integridad hidroecológica (Henriksen *et al.*, 2006).

La ecohidráulica estudia los vínculos entre los procesos físicos y las respuestas ecológicas en ríos, estuarios y humedales (Center for Ecohydraulic Research [CER], 2006). Su faceta fluvial establece un marco analítico local con alta resolución del hábitat físico generado en un tramo de río. Surgió en Estados Unidos para definir las condiciones de hábitat vinculadas a la subsistencia de la ictiofauna salmonícola residente en los ríos regulados del oeste.

Su premisa consiste en que el mapa de la distribución espacial del hábitat hidráulico en un segmento fluvial posibilita evaluar la disponibilidad del hábitat utilizable para los organismos objetivo, cuyas preferencias son conocidas. Este planteamiento ecológico de la hidráulica fluvial ofrece a los técnicos unos procedimientos analíticos valiosos para generar las recomendaciones defendibles que serán cada vez más escrutadas en el contexto de la conservación de ríos.

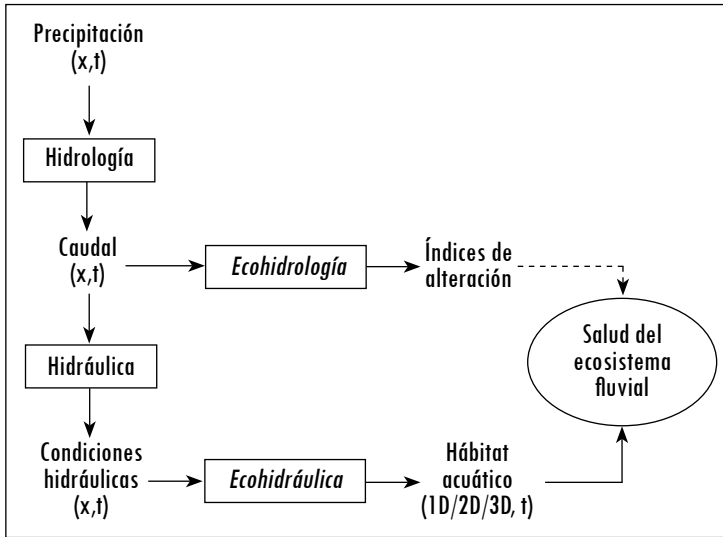
2. Aporte de la ecohidráulica a la conservación fluvial

El logro de los objetivos medioambientales en la conservación y recuperación de ríos se manifiesta, cuantifica y valora en términos de estado ecológico. Por ello es esencial disponer de unos métodos que correlacionen la ocurrencia de caudales y de conformaciones del cauce con determinadas funciones biológicas, y que estén enfocados en el diseño e implementación de medidas de intervención. La capacidad de la ecohidráulica para la diagnosis ambiental y su complementariedad con la ecohidrología se manifiestan en las conexiones y transformaciones existentes entre los eventos de flujo y el estado de la biota (Figura 1).

El régimen de caudales de un río depende inicialmente de la precipitación incidente en su cuenca hidrográfica, magnitud que varía espacial (x) y temporalmente (y). Los procesos hidrológicos determinados por las características de la cuenca transforman la precipitación en el régimen de caudales, cuya cantidad y calidad varían también bidimensionalmente dentro del dominio de drenaje. Las características del cauce rigen los procesos hidráulicos que convierten los caudales en condiciones hidráulicas locales, que varían temporalmente (t) y

espacialmente (x), con dimensionalidades espaciales determinadas por el esquema numérico de solución del flujo (1D, 2D y 3D).

Figura 1. Transformaciones y relaciones entre la precipitación y el estado ecológico del sistema fluvial



Nota: las líneas continuas corresponden a relaciones causales, mientras que la discontinua indica una presuposición operativa.

Fuente: adaptado de (James y Thoms, 2007).

La biota fluvial reacciona directamente a las condiciones del microambiente hidráulico e indirectamente al régimen de caudales (James y Thoms, 2007), por lo cual una conceptualización hidrobiológica cabal debe incorporar todos los procesos involucrados en las transformaciones anteriores. En consecuencia, la evaluación integral de los efectos ligados a una intervención humana precisa el manejo coordinado de las técnicas ecohidráulicas y ecohidrológicas.

La naturaleza comprensiva de la ecohidrología se cimienta en la motivación de calcular unos índices de la alteración hidrológica provocada por una perturbación concreta, que se correlacionan descriptivamente con un determinado estado ambiental del ecosistema fluvial. Por su parte, los ecohidráulicos poseen una visión aparentemente reduccionista (dominio limitado), pero en realidad sus bases conceptuales incluyen unas funciones hidrobiológicas consistentes que

explican las relaciones entre el caudal y el hábitat acuático de un modo causal, más allá de una simple descripción empírica.

Como la percepción básica del ambiente hidráulico que desarrollan los organismos está determinada comúnmente por las variables profundidad, velocidad y material del lecho (Milhous, 2007), la ecohidráulica constituye el marco analítico elemental para la conservación de hidrosistemas fluviales, que se complementa adecuadamente con las consideraciones ecohidrológicas.

3. Evaluación multidimensional del hábitat acuático

El desarrollo veloz de la informática personal y de la dinámica computacional de fluidos (DCF) experimentado durante la última década ha popularizado las herramientas hidrodinámicas de simulación, gracias a su descripción perfeccionada de los campos hidráulicos complejos, especialmente en ambientes muy rápidos, regímenes rápidamente variados y zonas de reflujo (Leclerc *et al.*, 1995; Katopodis, 2003; Panayiotis y Shen, 2007). Las soluciones numéricas bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) generan unos dominios espacialmente explícitos de alta resolución y precisión, que superan las aproximaciones simplificadas unidimensionales clásicas (1D).

La predicción hidrodinámica mejorada del microambiente hidráulico se utiliza en distintas ramas de la hidroingeniería y también en la simulación del entorno que percibe un organismo acuático y que conforma su hábitat físico. La ecohidráulica constituye, por lo tanto, un nuevo ámbito interdisciplinar en la DCF. A continuación se describen las fases de un estudio ecohidráulico fluvial enfocado en la conservación: (1) modelamiento hidráulico, (2) definición de los criterios biológicos de preferencia, (3) integración espacial y temporal del hábitat y (4) evaluación de efectos causados por intervenciones antrópicas.

4. Modelamiento hidráulico multidimensional

La formulación física de los esquemas de solución integrados en la DCF es variada, pues depende de la dimensionalidad con la que representan el aspecto distribuido del campo hidráulico fluvial: 2D, 3D y cuasi 3D. En cualquier caso, estas abstracciones transforman la realidad física en una formulación matemática descriptora del equilibrio del flujo (conservación de masa y volumen) en cada uno de los elementos *discretizadores* del dominio ecofluvial.

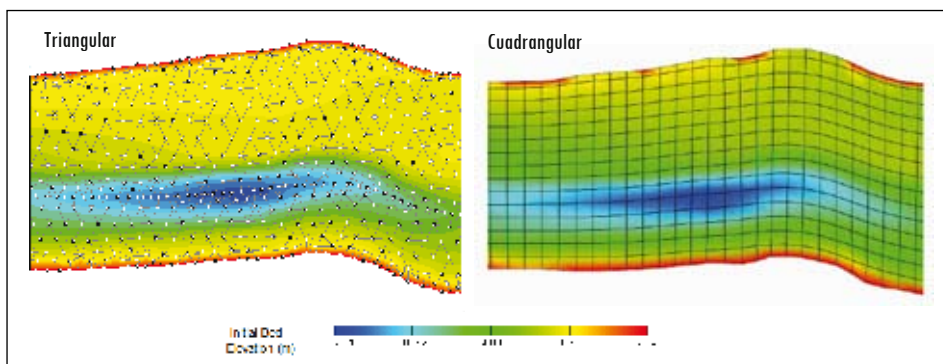
El sistema cuasi lineal de ecuaciones diferenciales parciales (EDP) regidor del flujo se cimienta en el sistema conservativo de las ecuaciones de Reynolds, con diferentes grados de simplificación matemática (promedios verticales, errores de

truncado, etc.) y representaciones físicas de la resistencia de fricción y turbulencia. Los esquemas numéricos resuelven en cada elemento microabiótico la profundidad y las componentes de la velocidad media en las direcciones concebidas. Tales variables, junto al material del lecho, constituirán el microhábitat acuático básico.

La representación del dominio físico se construye sobre el modelo digital de elevaciones (MDE) batimétricas, adecuadamente fragmentado mediante una malla computacional conformada por celdas que conectan los nodos topográficos. La tipología de las mallas es variada, ya que depende de la forma de sus celdas (triangular o cuadrangular), del ángulo formado entre ellas (ortogonal u oblicuo) y de la curvatura del sistema de coordenadas establecido (estructurada o no). La estructura de la malla desarrollada en un estudio particular está determinada, generalmente, por el método numérico empleado en la resolución informatizada de las EDP en el número finito de celdas fijado.

El esquema de elementos finitos posee una flexibilidad geométrica conveniente para caracterizar cauces geoméricamente complejos, y por lo general procesa una malla triangular, no ortogonal y no estructurada (Figura 2, izquierda). En cambio, la opción de volúmenes finitos goza de una mayor estabilidad numérica, que facilita la programación eficiente en mallas cuadrangulares, no ortogonales y estructuradas (Figura 2, derecha). En cualquier caso, la generación de una malla eficiente y robusta es una tarea fundamental de la DCF, que consume normalmente cerca del 80% del tiempo de modelado (Zang y Jia, 2005).

Figura 2. Sistemas de discretización multidimensional del dominio fluvial*



*El fragmento ilustrativo pertenece al río Magdalena, sector Barrancavieja (Colombia): aprox. longitud 1.500 m, anchura 600 m (506860E;1124346N). El flujo discurre de derecha a izquierda. Densidades muy reducidas por claridad. Izquierda: malla triangular no ortogonal y no estructurada, acomodada a la batimetría con el código R2DMesh (Steffler *et al.*, 2006). Derecha: malla cuadrangular, no ortogonal y no estructurada desarrollada con la aplicación CCE2D.

Fuente: (Zhang y Jia, 2005).

Los marcos matemáticos representativos del movimiento tridimensional más comunes derivan de las ecuaciones particularizadas de Reynolds para flujos turbulentos temporalmente promediados en un líquido incompresible, isotrópico y homogéneo. La formulación física espacialmente *discretizada* del dominio se reduce a un conjunto finito de EDP no lineales y asimétricas para las profundidades y velocidades medias en todas las celdas (Ecuación 1).

$$\begin{aligned} \rho \frac{\overline{Du}}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu_t \left(\frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial z^2} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x} \\ \rho \frac{\overline{Dv}}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + g_y + \nu_t \left(\frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial z^2} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial y} \\ \rho \frac{\overline{Dz}}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + g_z + \nu_t \left(\frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial z^2} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial z} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde x, y, z son las direcciones cartesianas (longitudinal, transversal y vertical) y t es el tiempo. Las cuatro incógnitas son las componentes de la velocidad puntual ($\overline{u}, \overline{v}, \overline{w}$) y la presión (p). La gravedad (g) actúa en las tres direcciones, y la densidad del líquido (ρ) es constante. Las dos variables complementarias son la viscosidad turbulenta (ν_t) y la energía cinética turbulenta (k).

La capacidad predictiva de un modelo hidrodinámico particular está condicionada por la dimensionalidad con la que representa el flujo (2D-3D) y por la eficacia de los algoritmos que incorporan las distribuciones de viscosidad y de energía cinética en las hipótesis subyacentes. Las aproximaciones 3D están reputadas como las más certeras (p. ej., flujo helicoidal en meandros), por lo que previsiblemente adquieren una relevancia progresiva para representar los ambientes microhidráulicos en los estudios del hábitat (Leclerc, 2002).

Sin embargo, los códigos 3D utilizados actualmente en ecohidráulica presentan dificultades para modelar los patrones de flujo complejos causados por elementos grandes del lecho o por el comportamiento inestable asociado con intervalos temporales cortos y turbulencia local. Las herramientas 2D son hoy en día las más aplicadas en el sector ecohidráulico de la DCF, debido a la exactitud notable de sus dominios explícitos y a su exigencia equilibrada de datos de campo para una calibración confiable.

El esquema hidrodinámico 2D, usual para flujos turbulentos permanentes, incorpora los fundamentos representados por las ecuaciones de Reynolds

(Ecuación 1), integradas en profundidad (*depth averaged*). El sistema de EDP resultante más común rige la conservación de la masa y de los momentos en las direcciones longitudinal y transversal (plano horizontal), y es resuelto en cada celda para la profundidad y las respectivas componentes integradas de la velocidad (Ecuación 2).

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(h \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h \tau_{xy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{Cor} v \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(h \tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h \tau_{yy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + f_{Cor} u \end{aligned} \quad (2)$$

Donde u y v son las componentes promediadas en profundidad de la velocidad en las direcciones x y y respectivamente; g es la aceleración gravitacional; Z es la elevación de la superficie libre; ρ es la densidad del agua; h es la profundidad local; f_{Cor} es el parámetro de Coriolis; τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} y τ_{yy} son los esfuerzos turbulentos de Reynolds integrados en profundidad; finalmente, τ_{bx} y τ_{by} son los esfuerzos cortantes sobre el lecho. El modelo de turbulencia ordinario representa los esfuerzos cortantes transversales de Reynolds mediante una formulación basada en la aproximación de Boussinesq (Ecuación 3).

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial x}; \tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right); \tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3)$$

Muchos códigos hidroinformáticos incorporan la viscosidad turbulenta ν_t mediante el modelo de longitud de mezcla (*mixing length*), promediado en profundidad (Ecuación 4).

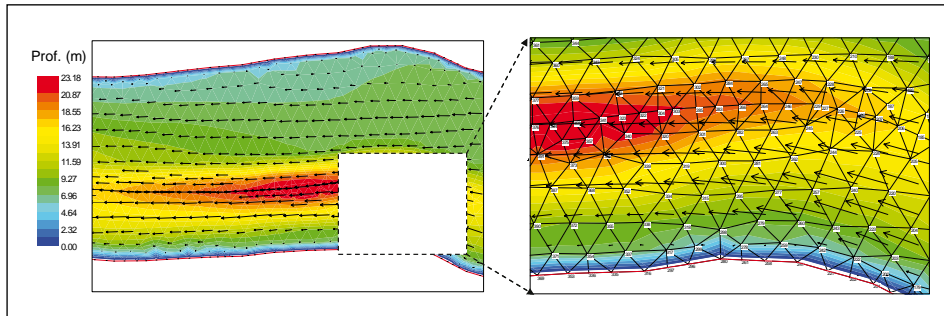
$$\begin{aligned} \nu_t &= \bar{l}^2 \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \right)^2} \\ \bar{l} &= \frac{1}{h} \int kz \sqrt{\left(1 - \frac{z}{h} \right)} dz = kh \int_0^1 \lambda \sqrt{1 - \lambda} d\lambda \approx 0,237kh \\ \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} &= C_m \frac{U^*}{kh} \end{aligned} \quad (4)$$

Donde k es la constante de la distribución vertical de velocidad de Von Kármán; U^* la velocidad de corte, y C_m un coeficiente de dispersión definible por el modelador, que por defecto vale 2,34.

La variable fundamental de la calibración multidimensional es la rugosidad de los materiales del lecho, que incluye el efecto del tamaño y de las formas en distintos coeficientes utilizables (Manning, Chézy, diámetros característicos, etc.). La descripción de la distribución espacial de la rugosidad en el dominio cimienta las aproximaciones sucesivas para lograr un factor de escala de rugosidad que minimice las discrepancias entre los campos de velocidad simulados y los medidos (solucionadores de EDP ligados a métodos numéricos).

La parametrización definitiva de los modelos abarca diversos coeficientes menos relevantes, que se incluyen ordinariamente en la rugosidad efectiva de cada celda de modo más o menos implícito. Las soluciones multidimensionales generan los campos de variables hidráulicas con significación ecológica (profundidad, velocidad, material del lecho, esfuerzo cortante, etc.) que fundamentan la evaluación sofisticada del hábitat (Figura 3).

Figura 3. Simulación hidrodinámica 2D promediada en profundidad de un fragmento fluvial mediante un esquema de elementos finitos informatizado en el paquete R2D*



* Corresponde al tramo ilustrativo del río Magdalena (Figura 2), que transporta un caudal próximo al módulo anual (7.500 m³/s). Izquierda: campos explícitos de profundidad (codificados en color) y de velocidad media (vectorial).

Derecha: detalle de una poza que muestra la malla triangular del modelo digital de elevaciones (nodos numerados), incluidas las componentes longitudinal y transversal de la velocidad en cada celda.

Fuente: (Steffler *et al.*, 2006).

5. Modelos biológicos de hábitat acuático

5.1 Selección de las variables abióticas constitutivas del hábitat

Los factores abióticos desarrollan roles ecológicos conocidos durante los distintos estadios vitales de los organismos acuáticos, por lo que determinan las características del microhábitat en el entorno físico de un organismo. La velocidad origina las fuerzas tractivas que experimenta la biota, que influyen notablemente en sus adaptaciones anatómicas y conductuales (Poff *et al.*, 1990). El gradiente de velocidad y el efecto de diferentes rugosidades son factores fundamentales que controlan la distribución local de la biota en un cauce (Goring y Biggs, 1996).

Existe evidencia (Allan, 1995) de los efectos relevantes de la velocidad en: (1) el tamaño y concentración de las partículas en suspensión y en la granulometría del lecho; (2) la distribución de gases importantes (O_2 y CO_2) y de nutrientes (detritus e insectos), y (3) los procesos de respiración y reproducción de algunas especies. La profundidad determina el espacio físico del río ocupable por la biota, y puede limitar la franqueabilidad para los organismos móviles (Jowett, 1992).

Otros procesos influidos por esta variable son la oxigenación mediante la turbulencia y la temperatura (McBride *et al.*, 1993), así como la fotosíntesis (Davies-Colley *et al.*, 1993). Adicionalmente, las profundidades en un cauce están ligadas a la anchura superficial, variable que controla el área total disponible para los organismos que viven en el lecho. El tamaño y composición del material del lecho tiene un papel primordial junto con la velocidad en la composición del ecosistema fluvial (De Nicola y McIntire, 1990). Las características del fondo condicionan en gran medida la vida de la ictiofauna dulceacuícola, ya que determinan el desarrollo de sus estrategias bentónicas y el estado de la fauna macroinvertebrada, que es el componente esencial de su dieta.

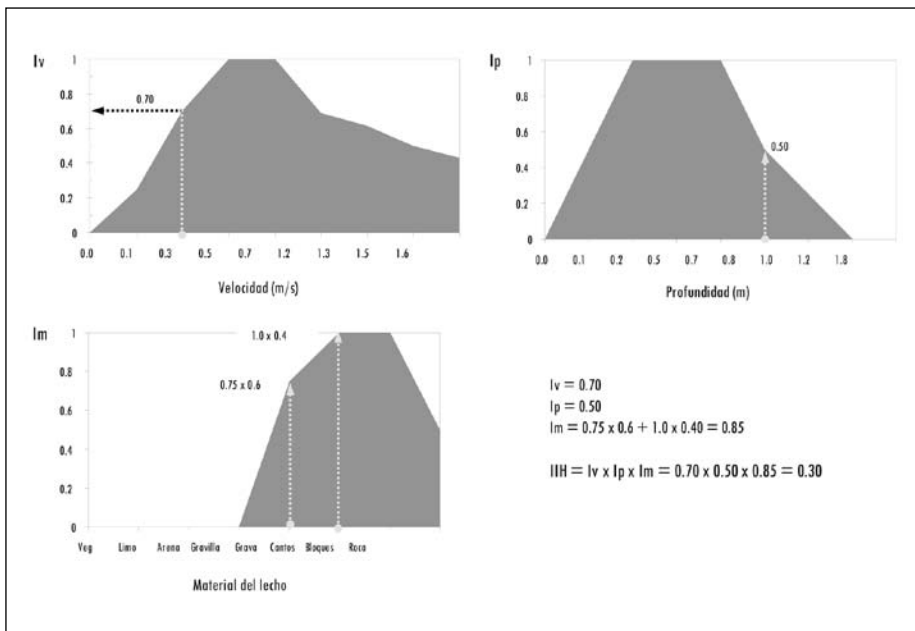
Tradicionalmente, el microhábitat físico acuático se modela con las tres variables clave anteriores (Bovee, 1978); sin embargo, existen otros atributos físicos y fisicoquímicos que pueden desempeñar un papel importante y deberían considerarse, como la temperatura del agua, la turbidez y la luminosidad (Bechara *et al.*, 2003). A mayor escala de segmento fluvial, las variables de la calidad del agua condicionan la idoneidad del macrohábitat: materia orgánica disuelta, material suspendido, iones disueltos, nutrientes disueltos, gases, pH y contaminantes (Davies-Colley *et al.*, 1993).

5.2 Definición de la preferencia biológica

El procedimiento clásico para evaluar el hábitat físico acuático consiste en determinar un índice de hábitat local, basándose en los rangos conocidos óptimos

de las condiciones abióticas para los organismos estipulados como objetivo en un estudio específico (Bovee, 1982). Generalmente, las especies fluviales contempladas son aquellas afectadas por eventuales cambios en el régimen de caudales (p. ej. presa, minicentral, extracción) o en la estructura del cauce (encauzamiento, dragado, etc.). El grado de adecuación de un organismo a las variables constitutivas del hábitat se representa mediante las funciones de preferencia (Figura 4), cuyas idoneidades varían entre 0 (inadecuado) y 1 (óptimo).

Figura 4. Ejemplo de funciones de preferencia para las variables velocidad, profundidad y material del lecho*



* Adaptadas para los macroinvertebrados bentónicos del río Palacé, Colombia (Díez Hernández y Ruiz Cobo, 2007).

Nota: Se calcula el Índice de Idoneidad de Hábitat (IIH) de una celda con velocidad 0,30 m/s, profundidad 0,80 m y material del lecho compuesto por una mezcla de 60% grava y 40% cantos. La agregación multiplicativa de idoneidades presupone una influencia equilibrada de las tres variables.

Fuente: presentación propia de los autores.

Estas relaciones derivan del tratamiento estadístico de las observaciones en campo (estudio de frecuencias presencia-ausencia), complementado con el asesoramiento de expertos. El Índice de Idoneidad del Hábitat (IIH) en cada elemento discretizador del dominio agrega las idoneidades individuales de las

variables de hábitat analizadas, generalmente mediante una media geométrica ponderada (Ecuación 5):

$$IIH(x,y) = Iv^a \cdot Ip^b \cdot Im^c \text{ con } a+b+c=1 \quad (5)$$

Donde: Iv , Ip e Im representan los índices de idoneidad simple para la velocidad (v), profundidad (p) y material del lecho (m), respectivamente. La importancia ecológica relativa de cada variable se incorpora mediante su respectivo peso agregador (a , b y c). Muchas veces se presupone una misma influencia de las variables ($a=b=c=1/3$), si bien existen métodos para discriminar la importancia explicativa relativa de cada factor biótico en la distribución espacial del organismo (p. ej., componentes principales o regresión).

6. Integración espacial y temporal del hábitat acuático

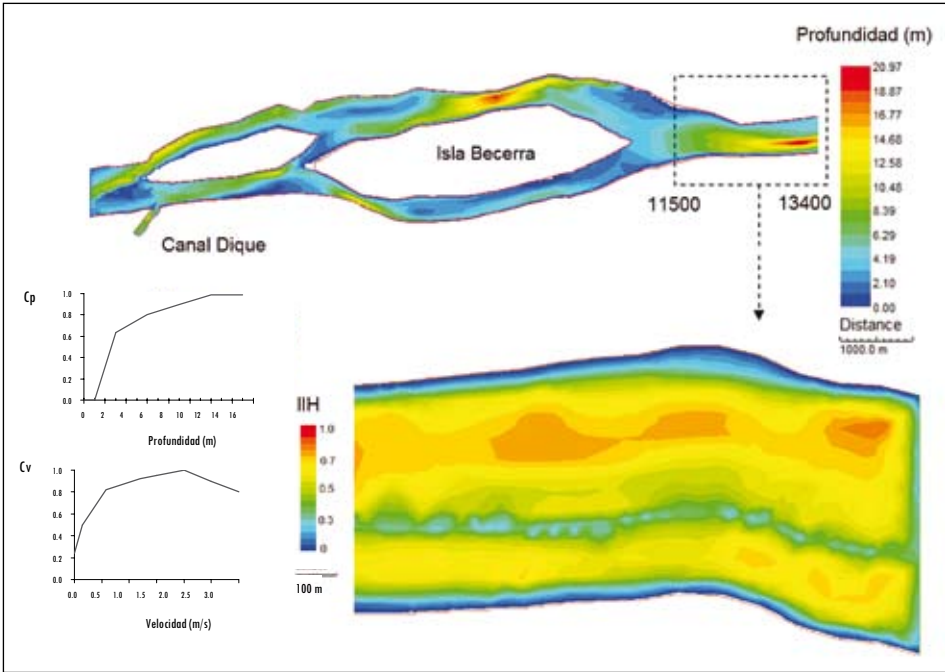
La extensión del algoritmo del modelo biológico a todos los elementos de la malla representativa produce una descripción predictiva del hábitat espacialmente distribuido y su disponibilidad en función del caudal (Figura 5). Esta resulta valiosa para determinar regímenes de caudales ecológicos y para comparar escenarios futuros con las condiciones históricas o alteradas (p. ej., trabajos de mejora del hábitat y cambio climático).

Con este planteamiento, el IIH puede utilizarse como factor de ponderación para calcular un índice de calidad del hábitat global en el tramo, el cual es directamente interpretable. El esquema asociativo del Índice de Hábitat (IH) integra numéricamente los IIH (x, y) de todas las celdas mojadas durante cada caudal simulado (Q) (Ecuación 6).

$$IH(Q) = \int_D IIH(x, y) dA \cong \int_N IIH(x, y) \Delta A_i \quad (6)$$

Esta expresión computa el área de cada celda A_i que compone el dominio de flujo (D), o bien un subdominio para alguna finalidad concreta (p. ej., zonas de freza comprendidas en el tramo). La simulación incremental del hábitat desarrolla las conocidas relaciones funcionales entre el caudal (Q) y el IH para los organismos estipulados (Figura 6, izquierda), las cuales ascienden típicamente de forma rápida hasta un entorno hidráulico que maximiza el hábitat en el tramo. Es muy normal que las descargas superiores disminuyan gradualmente la oferta de hábitat, debido al efecto simple o conjunto de las mayores velocidades y profundidades.

Figura 5. Evaluación espacialmente distribuida 2D del hábitat acuático físico mediante un modelo biológico de preferencia combinada (Bovee, 1982)



Nota: Arriba: descripción hidrodinámica 2D (promediada en profundidad) del río Magdalena, sector Calamar (14,5 km) para un caudal próximo al módulo anual (7.500 m³/s), mediante el esquema de elementos finitos codificado en R2D (Steffler *et al.*, 2006). Debajo: detalle del campo 2D de idoneidad del microhábitat (IIH) en el fragmento fluvial ilustrativo (abscisa 11500-13400), aproximado mediante dos funciones de preferencia genérica “gremial” (izquierda: profundidad y velocidad) que apuntan las estrategias de la ictiofauna residente y migratoria con requerimientos de hábitat similares (Díez Hernández, 2006). El material del lecho homogéneo actuaría tan sólo como factor de escala.

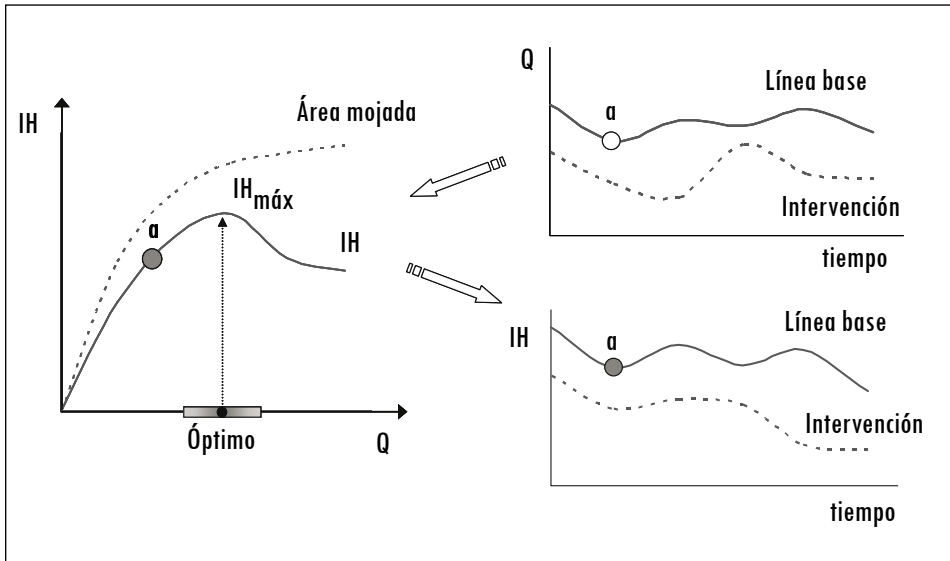
El flujo transcurre de derecha a izquierda.
Fuente: presentación propia de los autores.

El régimen hidrológico de un tramo fluvial determina las condiciones microhidráulicas cambiantes que controlan la oferta temporal del hábitat. Este efecto (hidro) ecológico ligado al tiempo se puede incorporar en las simulaciones ecohidráulicas, examinando las fracciones del hidrograma, correspondientes con los períodos de los diferentes estadios vitales de los organismos objetivo.

En consecuencia, es posible evaluar los efectos de cambios de caudal generados por actuaciones de regulación o de restauración fluvial, escrutando la variación del hábitat con respecto a las condiciones previas referenciales de la línea base.

Una técnica útil son las series temporales de hábitat, resultado de transformar las series temporales de caudales (Q) en los respectivos valores del IH, deducidos de la relación funcional Q-IH (Figura 6, derecha).

Figura 6. Resultados de la simulación espacio-temporal agregada del hábitat acuático



Nota: Izquierda: relación funcional caudal (Q)-Índice de Hábitat (IH) para un organismo objetivo, comparada con el área mojada superficial de la corriente. El intervalo de caudales adyacentes al que maximiza la función ($IH_{m\acute{a}x}$) satisface de forma óptima los requerimientos biológicos. Derecha: las series temporales de caudales, descriptores de la línea base y de una intervención (arriba), se vinculan con los valores respectivos de la curva Q-IH (puntos "a"), para deducir las respuestas ecohidráulicas en forma de series temporales de hábitat (abajo).

Fuente: presentación propia de los autores.

Como corolario, la respuesta de cualquier alteración de los caudales circulantes por un cauce (o de su estructura) se puede cuantificar en términos de calidad y cantidad del hábitat acuático, lo que hace de los modelos de hábitat una herramienta provechosa en los estudios de impacto ambiental y en los proyectos de restauración en el ámbito fluvial.

7. Capacidad descriptiva ecohidráulica del ambiente fluvial

El modelamiento matemático multidimensional del hábitat hidráulico supone una aproximación mejorada a la realidad, pero incorpora diversas inexactitudes, derivadas de las simplificaciones inherentes a las hipótesis de partida,

de la formulación descriptiva del flujo y de la eficiencia de su conversión en algoritmos computacionales. Por ello, los resultados deben ser interpretados con un juicio crítico, fundado en unos datos medidos en campo que permitan validar su confiabilidad.

Numerosas investigaciones evidencian que los patrones de flujo 2D-3D son más explícitos y atinados que los generados con las clásicas ecuaciones 1D, debido a sus representaciones más comprensivas del cauce y de los procesos de turbulencia y resistencia hidráulica (Leclerc *et al.*, 1995; Boudreau *et al.*, 1996; Koboltschnig *et al.*, 2002). La superioridad de las soluciones 2D, más significativa en términos ecohidráulicos, reside en la mejor precisión de sus campos de velocidad, cuyos errores predictivos suelen ser menores del 10% (Habersack, 1999; Parasiewicz, 2001).

Respecto al cálculo de los niveles de agua, las exactitudes de las técnicas 1D y 2D son prácticamente equiparables y resultan, en muchos casos, comparables con las imprecisiones del levantamiento hidrotopográfico, si bien los campos de profundidad hidrodinámicos posibilitan unos análisis espaciales detallados del hábitat que son exclusivos. Obviamente, los recursos necesarios para desarrollar una solución de flujo discretizada 2D confiable son mucho más exigentes que las simples representaciones del cauce 1D, mediante secciones transversales, lo que limita actualmente su ámbito de aplicación. Sin embargo, el rápido avance de la tecnología computacional y telemétrica hace previsible una utilización más generalizada de los métodos numéricos de la DCF en los estudios de hidráulica fluvial ecológica.

Aproximarse a la percepción de las condiciones hidráulicas que desarrolla la biocenosis acuática es una labor compleja, que requiere soluciones complejas y representativas de las múltiples dimensiones del proceso. Los sofisticados marcos analíticos 2D-3D caracterizan los patrones de flujo con una definición mejorada, comparable a la dimensión del microambiente hidráulico, al que responden los organismos con diferentes grados de movilidad. Sin embargo, no son ninguna panacea, ya que sus formulaciones actuales están simplificadas por las limitaciones en la informatización de los algoritmos. Este es el caso de muchos modelos de turbulencia utilizados, que presuponen un fenómeno estrictamente isotrópico, a pesar de las evidencias que lo refutan (Olsen, 2002) y que deberán considerarse en las implementaciones venideras.

Son conocidas las inexactitudes de las configuraciones 2D en cauces con rugosidades, que no sustentan las hipótesis de distribución vertical de velocidad uniforme, ni distribución hidrostática de presiones (Klonidis y Soulis, 2002).

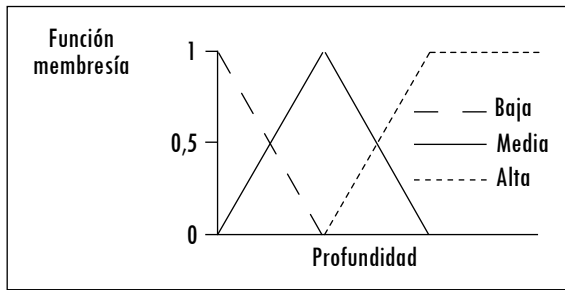
También su elevada sensibilidad a la rugosidad del lecho (característica de los modelos determinísticos), que es especialmente crítica en la simulación de las descargas bajas (Parasiewicz, 2001). El reciente análisis comparativo de las capacidades 2D y 3D en un río truchero de Estados Unidos con abundantes bloques (Diplas y Shen, 2007) detecta inconsistencias relevantes en los patrones de flujo 2D alrededor de las obstrucciones, que se solventan mediante los más ajustados pero complicados 3D: sobreestimación de velocidad, dirección incorrecta e insuficiente sensibilidad de la geometría durante los caudales altos.

Sin embargo, en las zonas alejadas del flujo complejo en los bloques, las soluciones 2D y 3D son similares. Este último hecho es consistente con las modelaciones multidimensionales del hábitat realizadas por (Hauer *et al.*, 2007) en un arroyo austriaco para la freza de un ciprínido reófilo. Al analizar los campos hidráulicos en 22 secciones transversales representativas de 400 m de longitud fluvial, encontraron algunas ubicaciones con predicciones 2D y 3D equiparables, e incluso tramos muy uniformes en las que resultan comparables a las 1D. En consecuencia, las investigaciones demuestran que la exactitud y representatividad hidráulica aumentan con la dimensionalidad de los modelos numéricos, si bien la elección del más conveniente para un estudio ecohidráulico concreto viene determinada por un juicio técnico valorativo del balance entre la confiabilidad y el coste (Díez y Burbano, 2007).

Respecto a los modelos de preferencia biológica, existen alternativas exitosas para contextos donde la información disponible sobre el comportamiento selectivo de los organismos objetivo es imprecisa o confusa (Schneider y Jorde, 2003). A diferencia de otros métodos que no permiten incorporar eficazmente los conocimientos hidrobiológicos existentes, la lógica difusa determina los niveles de idoneidad de hábitat a partir de una interpretación técnica consensuada de los criterios físicos.

El grado de pertenencia de una variable explicativa a cada uno de los intervalos de definición imprecisa de calidad de hábitat (baja, media y alta) se evalúa mediante las *funciones de membresía* (Figura 7). El valor numérico del hábitat en un elemento discretizador se asocia con una combinación de las variables relevantes, que utiliza los grados de membresía como factores de ponderación. Es decir, una profundidad puntual puede ser parcialmente baja (0,20) y mayoritariamente media (0,80).

Figura 7. Ilustración de una delineación difusa de criterios de preferencia mediante clases de calidad hábitat (baja, media y alta) para una variable explicativa (profundidad)



Fuente: adaptado (de Shneider y Jorde, 2003).

8. Ámbito práctico de la modelación ecohidráulica

Los principios regidores de la conservación o restauración de un ecosistema fluvial concreto dependen del conocimiento disponible de dicho hidrosistema y de la capacidad técnica para formular medidas que mejoren el estado ecológico de modo coherente con el objetivo. La ciencia de la salvaguardia fluvial es un desafío actual determinado por tres aspectos perfeccionables: (1) la interdisciplinariedad necesaria para una comprensión adecuada de los procesos y condiciones, (2) la incertidumbre intrínseca de las disciplinas anteriores y (3) las limitaciones de las herramientas evaluadoras del estado de recuperación-degradación.

Los objetivos de una gestión hídrica, en función del contexto social y económico, son diversos: desde recuperar la calidad del agua para usos consuntivos hasta mantener una producción piscícola, mejorar la estética o proteger la biodiversidad nativa. Pero si se procura una gestión verdaderamente ambiental basada en el autosostenimiento, se deberían salvaguardar los procesos y condiciones que determinan la estructura, la composición y el funcionamiento del ecosistema fluvial. La ecohidráulica y la ecohidrología contienen los conceptos y métodos suficientes para esta consecución.

La ecohidráulica ofrece herramientas científicas confiables para aproximarse a la percepción biocenótica del efecto combinado del régimen de caudales y de la estructura del cauce en el microhábitat acuático. En el contexto práctico, se vienen aplicando con éxito desde hace más de una década, para evaluar de modo comprensivo los requerimientos de caudal para la biocenosis fluvial, los conocidos *caudales ecológicos*. El procedimiento más aplicado en el ámbito mundial y contrastado científicamente para determinar provisiones de agua medioambiental es la metodología *Instream Flow Incremental Methodology* (IFIM) (Bovee, 1982),

que interpreta espacial y temporalmente los patrones de calidad de microhábitat asociados a diferentes escenarios hidrológicos o hidráulicos (figuras 6 y 7).

La tendencia emergente está orientada al uso de modelos hidráulicos sofisticados 2D, o incluso soluciones discretizadas 3D, como dato de entrada para los modelos de hábitat. En el ámbito iberoamericano, el IFIM se viene aplicando desde hace más de quince años en ríos de España (García de Jalón *et al.*, 1989) y, posteriormente, en Chile (Valdominos *et al.*, 2000) y Argentina (Bechara *et al.*, 2005). Las primeras simulaciones del IFIM en Colombia (Díez, 2006; Díez y Ruiz, 2007) suscitan líneas de investigación interesantes para salvaguardar la destacada biodiversidad de sus corrientes fluviales.

Otro ámbito aplicativo de la hidráulica ecológica es la participación en el diseño de medidas de mejora del hábitat fluvial, como son el mantenimiento del medio intersticial, las obras de paso para peces y las estructuras de bioingeniería (refugios de orilla o cauce, vertederos, deflectores, etc.). Los modelos distribuidos 2D-3D poseen la flexibilidad y la precisión necesaria para evaluar la efectividad de distintas alternativas en términos de hábitat.

El modelamiento del hábitat procura la evaluación predictiva de la calidad o idoneidad de las condiciones físicas acuáticas para la biota, pero en modo alguno pretende representar las dinámicas poblacionales o explicar la presencia o ausencia de una especie. Generalmente, el análisis del hábitat no incorpora de modo explícito las dinámicas ecológicas subyacentes a los criterios de preferencia utilizados (fundamentados en información de campo), por lo que los ecólogos fluviales más estrictos pueden considerarlo una simplificación hidroingenieril excesiva. De hecho, los estudios de hábitat deberían dedicar más esfuerzo a verificar las hipótesis biológicas y a validar los resultados y recomendaciones.

Por otra parte, los ingenieros que persiguen maximizar la exactitud de las predicciones microhidráulicas pueden sentirse defraudados por las aproximaciones de los patrones de microhábitat interpretados. Sin embargo, no debe perderse de vista que la variable decisiva en un análisis de hábitat no es la profundidad ni la velocidad, sino un índice evaluador de la utilidad del ambiente hidráulico para un organismo o para una utilidad cultural-recreativa. En cualquier caso, los científicos que utilizan los modelos de hábitat para mejorar su comprensión del ecosistema fluvial reconocen su conveniencia para incorporar las consideraciones ecológicas en la gestión de los recursos hídricos y en el diseño de intervenciones en el medio fluvial.

La nueva frontera interdisciplinaria para la DCF que supone la ecohidráulica aporta nuevos retos para los investigadores. Los modeladores del hábitat

responsables consideran adecuadamente las hipótesis y las limitaciones de los métodos hidráulicos y biológicos seleccionados: esquema de representación del cauce, ecuaciones del flujo, criterios de preferencia, cómputo del hábitat, etc. Además, no los deslumbra la vistosidad de las soluciones informáticas espacialmente distribuidas del flujo y del microhábitat, característica de los enfoques 2D-3D (efecto *voilà*), porque saben que la confiabilidad real de los resultados viene determinada por la calidad de la información introducida al modelo numérico.

Agradecimientos

El Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, ha facilitado los datos del levantamiento hidrotopográfico del tramo ilustrativo del río Magdalena.

Referencias

- ALLAN, J. D. *Stream ecology structure and function of running waters*. New York: Chapman & Hall, 1995.
- BAKER, T. J. Three-dimensional mesh generation by the triangulation of arbitrary point sets. *AIAA Paper 87-1124-CP*. 1987, pp. 255-271.
- BECHARA, J.; MORIN, J. and BOUDREAU, P. *Évolution récente de l'habitat du doré jaune, de la perchaude, du gran brochet et de l'achigan à petite bouche au lac Saint-François, fleuve Saint-Laurent*. R640, INRS-Eau, Terre & Environnement, 2003. 74 p.
- BECHARA, J. A.; ALABARCEZ, M. N. y RUIZ DÍAZ, F. J. *Informe final de la primera etapa del proyecto GEF-PNUD ARG02/G35*. Corrientes, Argentina: Instituto de Ictiología del Nordeste, Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad Nacional del Nordeste, 2005.
- BOUDREAU, P. *et al.* Two-dimensional habitat model validation based on spatial fish distribution: Application to juvenile atlantic salmon of Moisie River (Québec, Canada). *2nd International Symposium on Habitat Hydraulics*. INRS-Eau. Quebec, Canadá, 1996, pp. B365-B380.
- BOVEE, K. D. The incremental method for assessing habitat potential for cool water species, with management implications. *American Fisheries Society*, Special Publication, 1978, núm 11, pp. 340-346.
- . A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. *Instream Flow Information Paper*. 1982, núm. 12, p. 248.
- . Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology [documento en línea]. *Instream Flow Paper* núm. 21. *Biological Report*. 1986, vol. 86, núm. 7, 263 p. <<http://www.fort.usgs.gov/Products/Publications/1183/1183.pdf>> [Consulta: 07-10-2008].
- Center for Ecohydraulic Research (CER) [web en línea]. <<http://www.uiweb.uidaho.edu/ecohydraulics/>> [Consulta: 21-12-2007].

- DAVIES-COLLEY, R. J.; VANT, W. N. and SMITH, R. G. *Colour and clarity of natural waters: Science and management of optical water quality*. New York: Ellis Horwood, 1993.
- DE NICOLA, D. M. and MCINTIRE, C. D. Effects of substrate relief on the distribution of periphyton in laboratory streams. *Journal of Phycology*. 1990, núm. 26, pp. 624-633.
- DÍEZ, J. M. Modelación fluvial multidimensional (1D-2D) aplicada al cálculo de caudales ecológicos. *Actas XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, Popayán 15-16 de septiembre de 2006.
- DÍEZ, J. M. y BURBANO, L. Revisión de los modelos eco-hidráulicos uni-dimensionales (1D) y bi-dimensionales (2D) en corrientes fluviales. *Avances en Recursos Hidráulicos*. 2007, núm. 15, pp. 75-88.
- DÍEZ, J. M. y RUIZ, D. H. Determinación de caudales ambientales confiables en Colombia: el ejemplo del río Palacé (Cauca). *Gestión y Ambiente*. 2007, vol. 10, núm. 1, pp. 153-166.
- DIPLAS, P. and SHEN, Y. Use of two- and three-dimensional hydraulic models for addressing ecological aspects of stream flows. *Sixth International Symposium on Ecohydraulics*, 18-23 de febrero de 2007. [Christchurch: New Zealand].
- DUDGEON, D. *et al.* Freshwater biodiversity: importance, status, and conservation challenges. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*. 2006, vol. 81, núm. 2, pp. 163-182.
- GARCÍA DE JALÓN, D.; CASADO, C.; MAYO, M. y VILLETÀ, C. *Estimación de caudales ecológicos mínimos para el río Ojailén a su paso por Puertollano*. s. l.: INTECSA, 1989.
- GORING, D. G. and BIGGS, B. J. F. The effect of velocity and turbulence on the growth of periphyton in a cobble-bed stream: The 5-stone experiment. *2nd IAHR International Symposium on Habitat Hydraulics: A239-A250*, 1996.
- HABERSACK, H. M. Hydraulic simulation of natural river sections-field study and numerical model verification. *IAHR Congress*, Graz, Alemania, 1999.
- HAUER, D. *et al.* The necessity of modeling the stability of spawning grounds for reophilous cyprinids including a comparison between 1D, 2D and 3D numerical models. *Sixth International Symposium on Ecohydraulics*, 18-23 de febrero de 2007. [Christchurch: New Zealand].
- HENRIKSEN, J. *et al.* User's manual for the hydroecological integrity assessment process software (including the New Jersey Assessment tools). *U. S. Geological Survey, Biological Resources Discipline*. Open File Report 2006-1093, 2006.
- JAMES, C. S. and THOMS, M. C. The natural flow paradigm revisited. *Sixth International Symposium on Ecohydraulics*, 18-23 de febrero de 2007. [Christchurch: New Zealand].
- JOWETT, I. G. River hydraulics and instream habitat modeling for river biota. En MOSELEY, M. P. (ed.). *Waters of New Zealand*. Wellington: New Zealand Hydrological Society, 1992, pp. 249-263.

- KATOPODIS, C. Case studies of instream flow modelling for fish habitat in Canadian Prairie Rivers: State-of-the-art in habitat modelling and conservation flows. *Canadian Water Resources Journal*. 2003. vol. 28, núm. 2, pp. 199-216.
- KLONIDIS, A. J. and SOULIS, J. V. An implicit scheme for steady two-dimensional free-surface flow calculation. *Journal of Hydraulic Research*. 2001, vol. 39, núm. 4.
- KOBOLTSCHNIG, G.; MADER, H. and MAYR, P. WG1a "raw data" sub-group: "Physical habitat and instrumentation" [documento en línea]. Informe elaborado para el European Aquatic Modelling Network (EAMN) COST Action 626, 2002. <http://www.energy.sintef.no/eamn/documents/soa-report/report-parts/WG1report_part_a.pdf> [Consulta: 21-12-2007].
- LECLERC, M. Ecohydraulics, las frontier for fluvial hydraulics: Research challenges and multidisciplinary perspectives. *Key-note. Proceedings of RiverFlow Conference. On the behalf of IAHR*, Louvain-la-Neuve, Belgium, septiembre de 2002.
- ; BOUDREAUTL, A.; BECHARA, T. A. and CORFA, G. Two dimensional hydrodynamic modeling: a neglected tool in the Instream Flow Incremental Methodology. *Transactions American Fisheries Society*. 1995. vol. 124, núm. 5, pp. 645-662.
- LECLERC, M. A.; SAINT-HILARIE, A. and BECHARA, J. State-of-the-art and perspectives of habitat modeling for determining conservation flows. *Canadian Water Resources Journal*. 2003, vol. 28, núm. 2, pp. 135-172.
- MCCBRIDE, G. G. *et al.* Optimising the compensation flow requeriments of a river impounded for water supply. *Rivers for our Future, Department of Irrigation and Drainage*, Kuala Lumpur, Malasya, noviembre de 1993, pp. 4B/1/1-15.
- MILHOUS, R. T. Relating Streamflows to the health of an aquatic ecosystem. *Sixth International Symposium on Ecohydraulics*, 18-23 de febrero de 2007. [Christchurch: New Zealand].
- MULLER, G. A. and MARSH, P. C. Lost a desert river and its native fishes: A historical perspectiva of the lower Colorado River. *USGS Information and Technology Report USGS/BRD/ITR-2002-0010*, 2002.
- NATURE CONSERVANCY. *Indicators of hydrologic alteration versión 7 user's manual* [web en línea]. 2007. <<http://www.nature.org/>> [Consulta: 21-12-2007].
- OLSEN, N. *Hydroinformatics, fluvial hydraulics and limnology*. Trondheim, Noruega: Norwegian University of Science and Technology, 2002.
- PANAYIOTIS, D. and SHEN, Y. Use of two and three-dimensional hydraulic models for addressing ecological aspects of the stream flows. *Sixth International Symposium on Ecohydraulics*, 18-23 de febrero de 2007. [Christchurch: New Zealand].
- PARASIEWICZ, P. MesoHABSIM: A concept for application of instream flow models in river restoration planning. *Fisheries*. 2001, vol. 26, núm. 9, pp. 6-13.
- POFF, N. L.; VOELZ, N. J. and WARD, J. V. Algal colonisation under four experimentally-controlled current regimes in a regional analysis of streamflow patterns. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1990, núm. 46, pp. 1805-1818.

- POFF, N. L. Natural flow regime as paradigm for river restoration: A ecohydrologic context for ecohydraulics? *Fifth International Symposium on Ecohydraulics*, 12-17 de septiembre de 2004. [Madrid: España].
- SCHNEIDER, M. and JORDE, K. Fuzzy-ruled based models for the evaluation of fish habitat quality and instream flow assessment. *IFIM User's Workshop*, Fort Collins, 2003.
- STEFFLER, P.; SANDELIN, J. and YANG, Z. *R2Mesh versión 2.03* [web en línea]. Alberta, Canada: University of Alberta, 2006. <<http://www.river2d.ualberta.ca/>> [Consulta: 18-11-2007].
- VALDOMINOS, C. *et al.* *Determinación del caudal mínimo ecológico del proyecto hidroeléctrico Quilleco en el río Laja considerando variables asociados a la biodiversidad y disponibilidad de hábitats*. Concepción, Chile: Centro de Ciencias Ambientales EULA-Universidad de Concepción, 2000.
- ZALEWSKI, M. Flood pulses and river ecosystem robustness: Frontiers in flood research. *International Association of Hydrological Sciences (IAHS)*. 2006, núm. 305, pp. 143-154.
- ZANG, Y. and JIA, Y. *National Center for Computational Hydroscience and Engineer*. [web en línea] 2005. <<http://www.ncche.olemiss.edu/index.php?page=freesoftware>> [Consulta: 18-11-2007].

