

# Evaluación hidrodinámica del hábitat ecohidráulico dirigida a la conservación y restauración de hidrosistemas fluviales

## Hydrodynamic ecohydraulic habitat assessment aimed at conserving and restoring fluvial hydrosystems

Juan Manuel Diez-Hernández<sup>1</sup>

### RESUMEN

La eficacia de las medidas de conservación y restauración fluvial es evaluada en términos de la mejora del estado ecológico, comparando los escenarios futuros con las condiciones históricas o alteradas. La ecohidráulica ofrece herramientas científicas valiosas para diagnosticar ambientalmente los ecosistemas lóticos, evaluando el efecto combinado del régimen de caudales y la estructura del cauce en la calidad del hábitat acuático. Este trabajo aborda de modo analítico-sintético el desafío interdisciplinar que supone la ecohidráulica fluvial para la dinámica computacional de fluidos (DCF), en el contexto de la gestión hídrica ecosistémica. Se describe el procedimiento de evaluación multidimensional (2D/3D) del hábitat acuático, su capacidad predictiva y las aplicaciones principales. El modelamiento hidrodinámico es revisado en cuanto al esquema de caracterización fluvial y las formulaciones físicas. Se destaca el esquema 2D integrado en profundidad (*depth-averaged*), cuyo error predictivo de velocidad, normalmente inferior al 10%, supera las simplificaciones clásicas unidimensionales (1D). Se resumen los aspectos básicos de los modelos biológicos de hábitat, como son las variables abióticas y la preferencia biológica. Finalmente, se ilustra la combinación de los criterios ecológicos con los patrones hidrodinámicos de flujo, para generar los campos de hábitat discretizados que se integran espacial y temporalmente en los análisis ecohidráulicos.

**Palabras clave:** ecohidráulica, hábitat acuático, modelos 2D/3D, hidrodinámica.

### ABSTRACT

Fluvial conservation and restoration measures' efficiency was evaluated in terms of ecological state enhancement, comparing future scenarios with historical or altered conditions. Ecohydraulics provides valuable scientific tools for the environmental diagnosis of lotic ecosystems, evaluating the combined effect of flow regime and channel structure on habitat quality for aquatic biota. This paper adopts an analytic-synthetic approach to the interdisciplinary challenge of fluvial ecohydraulics for computational fluid dynamics (CFD) within the framework of ecosystem water management. The procedure for multidimensional (2D/3D) evaluation of the physical aquatic habitat is described as well as its predictive ability and main applications. The 2D depth-averaged scheme is highlighted whose velocity simulation error (being normally lower than 10%) overcomes classic one-dimensional (1D) simplifications. The basic aspects of biological habitat modelling, abiotic variables and biological preference are summarised. Combining ecological criteria with hydrodynamic flow patterns is illustrated for producing discrete habitat fields which were then spatially and temporarily integrated in ecohydraulic analysis.

**Keywords:** ecohydraulics, aquatic habitat, 2D/3D model, hydrodynamics.

Recibido: enero 22 de 2008

Aceptado: junio 23 de 2008

### Nuevos paradigmas en la comprensión ecosistémica de un río

Las alteraciones significativas de la calidad ambiental de los ríos 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 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, difiriendo en cuanto al dominio hidrológico estudiado, la escala espacial y temporal de aplicación, y las aproximaciones analíticas (Poff, 2004). La utilización coordinada de

<sup>1</sup> Ingeniero forestal, Universidad de Lérida, España. Ph.D., Ingeniería Forestal, Universidad de Valladolid, España. Post. Ph.D., Laboratorio de Ensayos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Profesor, Grupo de Hidráulica e Hidrología, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, España. [jmdiez@iaf.uva.es](mailto:jmdiez@iaf.uva.es)

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 fluvial. El entendimiento mejorado de los procesos y condiciones que determinan la estructura, composición y funcionamiento de los ecosistemas posibilita formular directrices científicas 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, enfocadas al manejo equilibrado del ecosistema. Los ecohidrologos conciben una regulación del hidrosistema dual, utilizando simultáneamente los procesos ecológicos e hidrológicos para salvaguardar la integridad ecológica global en unas condiciones alteradas (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 en el que las respuestas de los organismos a las condiciones abióticas varían dinámicamente en el espacio y en el tiempo (James *et al.*, 2004). Los procedimientos principales calculan un conjunto de índices hidrológicos que representan las características de la variabilidad de caudales con demostrada significación biológica (Nature Conservancy, 2007; Henriksen *et al.*, 2006).

La ecohidráulica estudia los vínculos entre los procesos físicos y las respuestas ecológicas en los ríos, estuarios y humedales (CER, 2006). Su vertiente fluvial establece un marco analítico local con alta resolución del hábitat físico generado en un tramo de río. Surgió en EE. UU. 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 fragmento fluvial posibilita la evaluación de 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 comprensivos muy valiosos para generar las recomendaciones defendibles que serán cada vez más escrutadas en el contexto de la conservación de ríos.

## Aportación 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, los cuales estén enfocados al 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 preci-

pitación 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, las cuales varían en el tiempo ( $t$ ), y también en el espacio ( $x$ ) con dimensionalidades determinadas por el esquema numérico de solución del flujo (1D, 2D o 3D). 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 ecohidrologías.

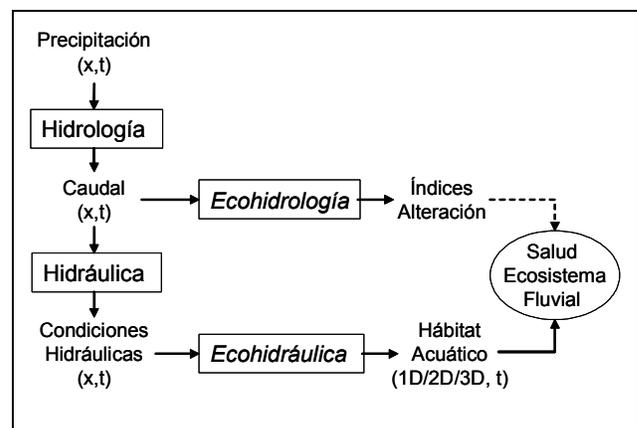


Figura 1. Transformaciones y relaciones entre la precipitación y el estado ecológico del sistema fluvial, interpretadas por los enfoques ecohidrologico y ecohidraulico. Las líneas continuas corresponden a relaciones de tipo causal, mientras que la discontinua indica una pre-suposición operativa

La naturaleza comprensiva de la ecohidrología se cimenta 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 ecohidrologías.

## 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 en ambientes de flujo complejos (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 confiabilidad que superan las aproximaciones simplificadas unidimensionales clásicas (1D). La predicción cinemática 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 tanto, un nuevo ámbito interdisciplinar en la DCF. A continuación se describen las fases de un estudio ecohidráulico fluvial dirigido a la conservación o restauración: 1) modelamiento hidráulico, 2) definición de los criterios biológicos de preferencia, 3) integración espacial y temporal del hábitat, y 4) evaluación de los efectos causados por intervenciones antrópicas.

### Bases del modelamiento hidráulico multidimensional

La formulación física de los esquemas de solución integrados en la DCF es variada, dependiendo de la dimensionalidad con la que representan el aspecto distribuido del campo hidráulico fluvial: 2D, 3D y cuasi3D. 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, variables que junto al material del lecho constituirán el microhábitat acuático básico.

La representación del dominio físico se construye sobre el modelo digital de elevaciones (MDE) del cauce, adecuadamente fragmentado mediante una malla computacional conformada por celdas que conectan los nodos topográficos. La tipología de las mallas es variada, dependiendo de la forma de sus celdas (triangular/cuadrangular), del ángulo formado entre ellas (ortogonal/oblicuo), y de la curvatura del sistema de coordenadas establecido (sí/no estructurada). Las características de la malla desarrollada en un estudio particular dependen generalmente del tipo de método numérico utilizado

en la resolución informatizada de las EDP en el número finito de celdas.

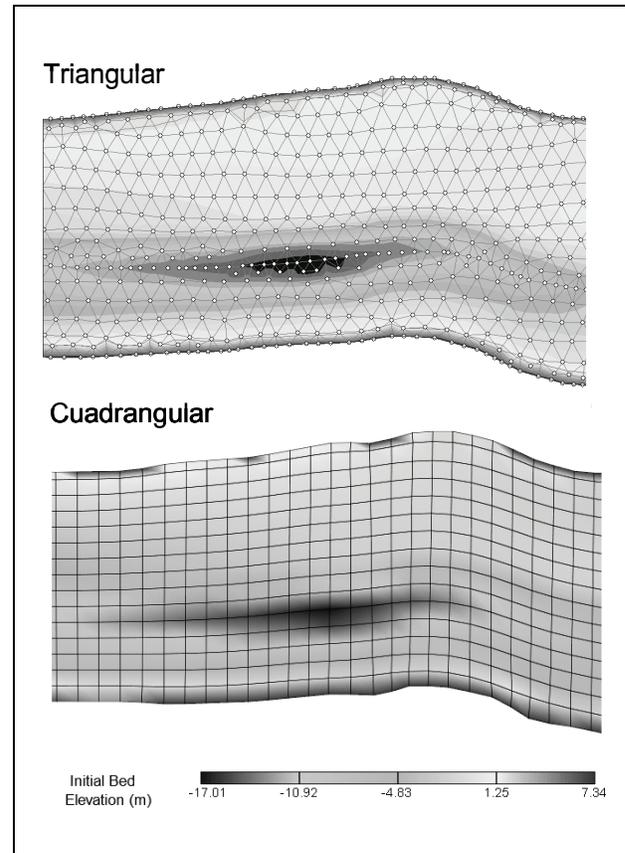


Figura 2. Sistemas alternativos de discretización multidimensional del dominio fluvial. Densidades de nodos muy reducidas por claridad. El flujo discurre de derecha a izquierda. Arriba: malla triangular no ortogonal y no estructurada, acomodada a la batimetría con el código R2DMesh (Steffler *et al.*, 2006). Abajo: malla cuadrangular, no ortogonal y no estructurada, desarrollada con CCHE2D (Zhang y Jia, 2005). El fragmento ilustrativo pertenece al río Magdalena, sector Barrancavieja (Colombia): aprox. long. 1500 m, anch. 600 m (506860E;1124346N)

El esquema de elementos finitos posee una flexibilidad geométrica conveniente para caracterizar cauces geométricamente complejos, por lo que normalmente procesa una malla triangular, no ortogonal y no estructurada (figura 2, arriba). En cambio, la opción de volúmenes finitos goza de una mayor estabilidad numérica, la cual facilita la programación con mallas cuadrangulares, no ortogonales y estructuradas (Figura 2, abajo). En cualquier caso, la generación de una malla eficiente y robusta es una tarea fundamental en la DCF, por lo que no debe extrañar que consuma normalmente cerca del 80% del tiempo de modelado (Zang y Jia, 1995). Los marcos matemáticos representativos del movimiento tridimensional más comunes derivan de las ecuaciones de Reynolds particularizadas para regímenes turbulentos (promediados temporalmente) en un líquido incompresible, isotrópico y homogéneo. La formulación física discretizada se reduce a un conjunto finito de EDP no lineales y asimétricas

para las profundidades y las velocidades medias en todas las celdas del dominio (ecuación 1).

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

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 ( $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ ) y la presión ( $\bar{p}$ ). La gravedad ( $g$ ) actúa en las tres direcciones. Las variables complementarias son la viscosidad turbulenta ( $\nu_t$ ) 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 cual es previsible que adquieran una relevancia progresiva para representar los ambientes microhidráulicos en los estudios del hábitat (Leclerc, 2002). Sin embargo, la mayoría de códigos 3D presentan en la actualidad restricciones significativas en la simulación de patrones de flujo complejos causados por elementos grandes del lecho, o bien debidas a la inestabilidad ligada a intervalos temporales cortos y turbulencia local (Secretan *et al.*, 2001; Hardy y Addley, 2003). Las herramientas 2D son hoy 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 defendible. El esquema hidrodinámico 2D usual para flujos 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  $x$  e  $y$  respectivamente;  $g$  es la aceleración gravitacional;  $Z$  es la elevación de la superficie libre;  $\rho$  es la densidad del agua;  $h$  es la profundidad local;  $f_{Cor}$  es el parámetro de Coriolis;  $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{yx}$  y  $\tau_{xy}$  son los esfuerzos turbulentos de Reynolds integrados en profundidad; finalmente,  $\tau_{bx}$  y  $\tau_{by}$  son los esfuerzos cortantes sobre el lecho. El modelo de turbulencia ordinario representa los esfuerzos transversales de Reynolds mediante una formulación basada en la aproximación de Boussinesq (ecuación 3):

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

La viscosidad turbulenta  $\nu_t$  es incorporada por muchos códigos hidroinformáticos mediante el modelo de longitud de mezcla (*Mixing Length*) promediado en profundidad (ecuación 4).

$$\begin{aligned} \nu_t &= \bar{l}^2 \sqrt{2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \right)^2} \\ \bar{l} &= \frac{1}{h} \int_k z \sqrt{\left( 1 - \frac{z}{h} \right)} dz = kh \int_0^1 \lambda \sqrt{1 - \lambda} d\lambda \approx 0.237kh \\ \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} &= C_m \frac{U^*}{kh} \end{aligned} \quad (4)$$

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 es la rugosidad efectiva de los materiales del lecho, que incluye el efecto del tamaño y de las formas en distintos coeficientes utilizables (Manning, Chézy, etc). La caracterización de la distribución espacial de la rugosidad en el dominio cimenta las aproximaciones sucesivas para lograr un factor de escala de rugosidad que minimice las discrepancias entre los campos de velocidad simulados y los medidos. La parametrización definitiva de los modelos abarca diversos coeficientes menos relevantes, que se incluyen ordinariamente en la rugosidad 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).

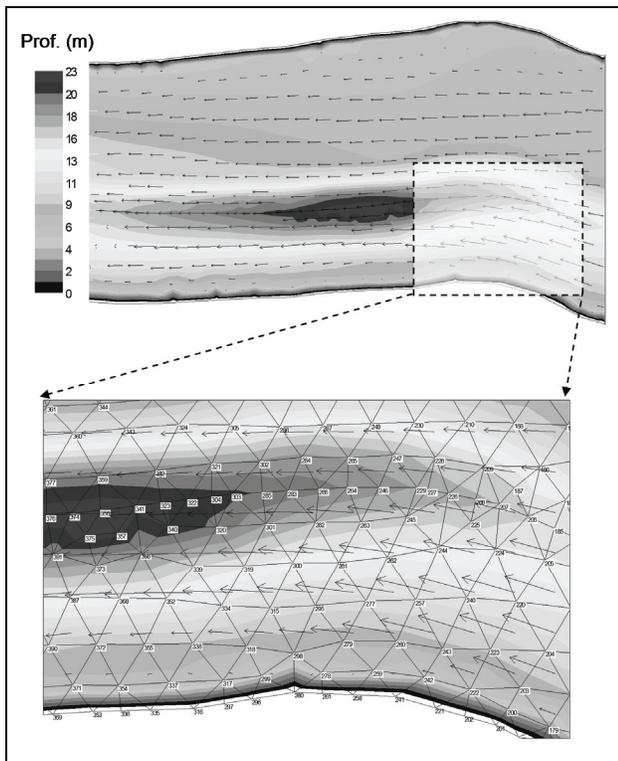


Figura 3. Simulación hidrodinámica 2D promediada en profundidad de un fragmento fluvial mediante un esquema de elementos finitos informatizado en el paquete R2D (Steffler et al., 2006). Corresponde al tramo ilustrativo del río Magdalena transportando un caudal Próximo al módulo anual (7.500 m<sup>3</sup>/s). Arriba: campos explícitos de profundidad (codificados en color) y de velocidad media (vectorial). Abajo: detalle de la poza mostrando la malla triangular (nodos numerados) con las componentes longitudinal y transversal de la velocidad en cada celda

## Modelos biológicos de hábitat acuático

### Selección de las variables abióticas

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, las cuales influyen en gran medida 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<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>) 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 ocupan el lecho. El tamaño y composición del material de fondo tiene un papel primordial junto con la velocidad en la composición del ecosistema fluvial (De Nicola et al., 1990). Las características del lecho 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.

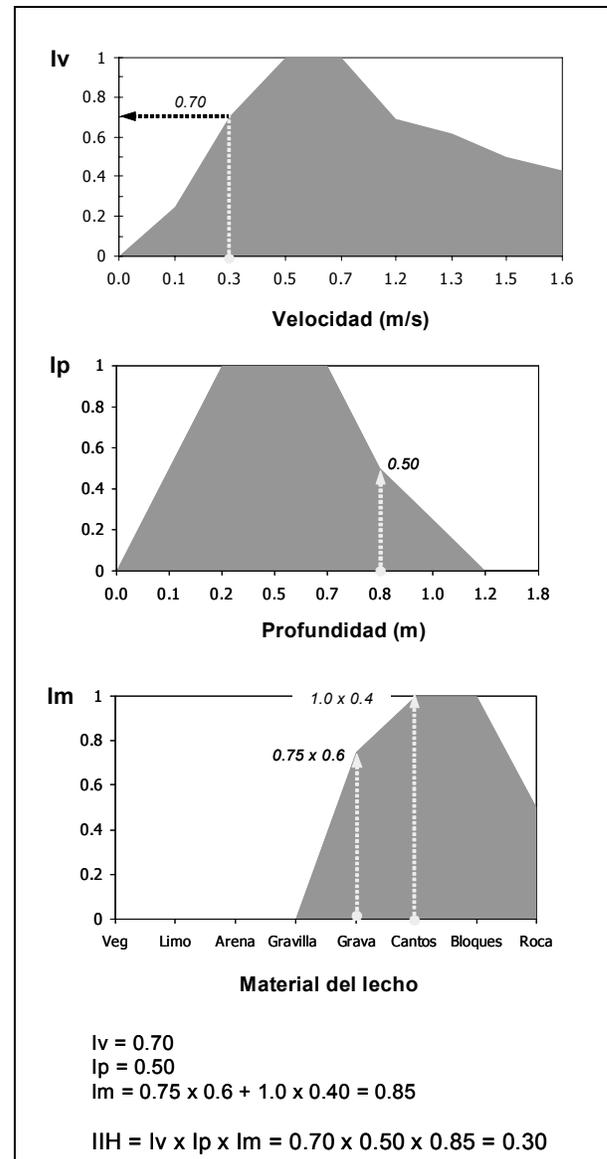


Figura 4. Ejemplo de funciones de preferencia para las variables velocidad, profundidad y material del lecho, adaptadas para los macroinvertebrados bentónicos del río Palacé, Colombia (Díez Hernández y Ruiz Cobo, 2007). Se calcula el índice de idoneidad de hábitat (IIH) de una celda con velocidad 0,30 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

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

### Definición de la preferencia biológica

El procedimiento clásico para evaluar el hábitat físico acuático consiste en determinar un índice de hábitat local, basado en los rangos conocidos óptimos de las variables abióticas para los organismos estipulados como objetivo en un estudio concreto (Bovee, 1982). Las especies fluviales contempladas generalmente son aquellas afectadas por eventuales cambios en el régimen de caudales (presa, minicentral, captación, etc.) o en la estructura del cauce (encauzamiento, canalización, 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). Estas relaciones derivan del tratamiento estadístico de las observaciones de campo, complementado con el asesoramiento de expertos. El índice de idoneidad del hábitat (IIH) en cada elemento discretizador agrega las idoneidades individuales de las variables de hábitat, generalmente mediante una media geométrica ponderada (ecuación 5):

$$IIH(x,y) = I_v^a \cdot I_p^b \cdot I_m^c \quad (5)$$

$$(a+b+c=1)$$

Donde:  $I_v$ ,  $I_p$ ,  $I_m$ , 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).

### 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 evaluación resulta provechosa para comparar escenarios futuros con las condiciones históricas o alteradas (p. ej. trabajos de mejora del hábitat, cambio climático), y también para determinar regímenes de caudales ecológicos. Con este planteamiento, el IIH puede ser utilizado como factor de ponderación para calcular un índice de calidad global del hábitat

en el tramo, que es directamente interpretable. El esquema asociativo del índice de hábitat (IH) integra numéricamente los IIH ( $x,y$ ) de todas las celdas mojadas durante un caudal simulado ( $Q$ ) (ecuación 6).

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

Esta expresión computa el área de cada celda  $A_i$  que compone el dominio de flujo ( $D$ ), o bien un sub-dominio 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 índice de hábitat (IH) para los organismos estipulados (figura 6, izqda.), las cuales ascienden típicamente de forma rápida hasta un entorno hidráulico que maximiza el hábitat en el tramo. Es normal que las descargas superiores disminuyan gradualmente la oferta de hábitat, debido al efecto simple o conjunto de las mayores velocidades y profundidades.

El régimen hidrológico de un tramo fluvial determina las condiciones microhidráulicas cambiantes que controlan la oferta temporal de hábitat. Este efecto ligado al tiempo (ecohidrológico) se puede incorporar en las simulaciones ecohidráulicas, examinando las fracciones del hidrograma que corresponden con los períodos de los diferentes estadios vitales y 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 índice de hábitat (IH), deducidos de la relación  $Q$ -IH (Figura 6, dcha).

### Capacidad descriptiva ecohidráulica del ambiente fluvial

El modelamiento numérico 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 de 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, 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 hidrotopográficas, si bien los campos de profundidad hidrodinámicos posibilitan unos análisis detallados del hábitat que son exclusivos. Obviamente, los recursos necesarios para desarrollar una solución de flujo discretizada 2D 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 avance rápido 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.

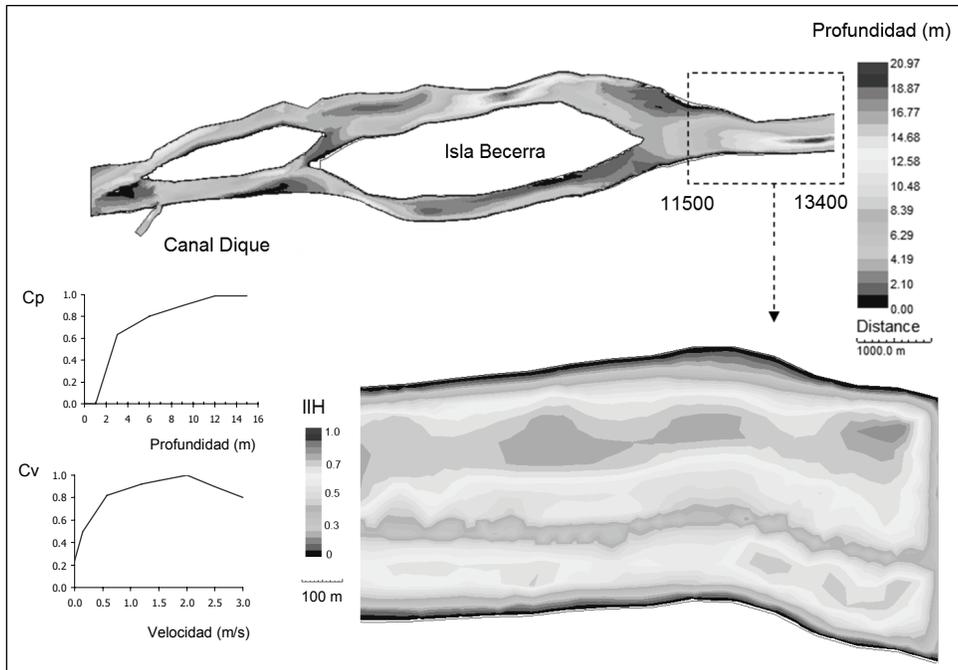


Figura 5. Evaluación espacialmente distribuida 2D del hábitat acuático físico mediante un modelo biológico de preferencia combinada (Bovee, 1982). Arriba: descripción hidrodinámica 2D (promediada en profundidad) del río Magdalena – sector Calamar (14,5 km) para un caudal próximo al módulo anual (7.500 m<sup>3</sup>/s), mediante el esquema de elementos finitos de R2D (Steffler et al., 2006). Abajo: detalle del campo 2D de idoneidad del microhábitat (IIH) en el fragmento fluvial ilustrativo, aproximado mediante dos funciones de preferencia genérica “gremial” (izqda: profundidad y velocidad) que apuntan las estrategias de la ictiofauna residente y migratoria con requerimientos de hábitat similares (Diez Hernández, 2006). El material del lecho homogéneo actuaría tan solo como factor de escala. El flujo transcurre de derecha a izquierda.

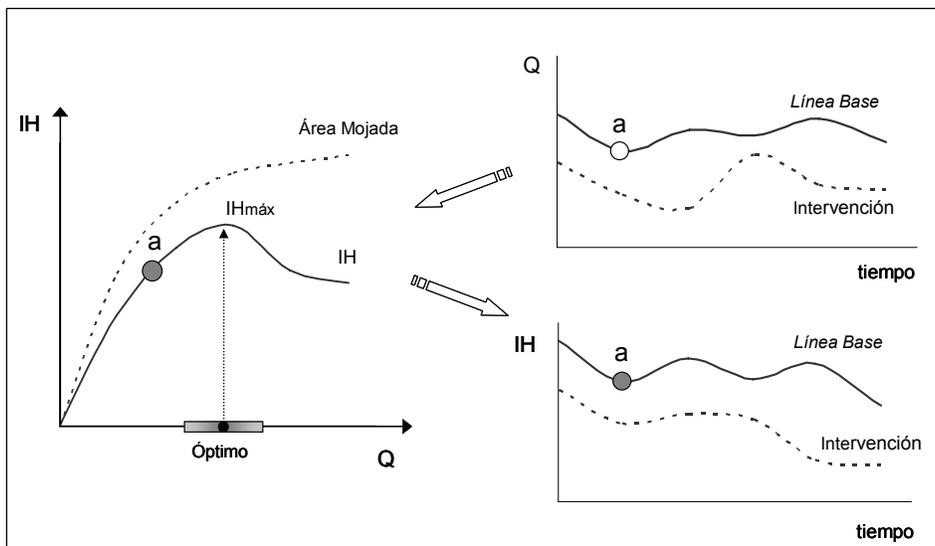


Figura 6. Resultados de la simulación espacio-temporal agregada del hábitat acuático. Izqda: relación funcional caudal (Q) – índice de hábitat (IH) para un organismo objetivo, comparada con el área mojada superficial de la corriente. El intervalo de caudales adyacentes al que maximiza la función satisface de forma óptima los requerimientos biológicos. Dcha: las series temporales de caudales descriptivas 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).

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 perfeccionada, comparable a la dimensión del microambiente hidráulico al que responden los organismos con diferentes grados de movilidad. Sin embargo, no son una panacea, ya que sus formulaciones actuales están simplificadas por las limitaciones en la informatización de los algo-

ritos. 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 considerar las implementaciones venideras. Son conocidas las inexactitudes de las configuraciones 2D en cauces con rugosidades que no sustentan las hipótesis de distribución vertical uniforme de velocidad, ni distribución hidrostática de presiones (Klonidis y Soulis, 2002); también, su elevada sensibilidad a la rugosidad del lecho, la cual es especialmente crítica en la simulación de descargas bajas (Parasiewicz, 2001). El reciente análisis comparativo de las

capacidades 2D y 3D en un río truchero de EE. UU. con abundantes bloques (Diplas y Shen, 2007) detecta inconsistencias relevantes en los patrones de flujo 2D alrededor de las obstrucciones, las cuales solventan los más ajustados pero complicados recursos 3D: sobreestimación de velocidades, direcciones incorrectas, e insuficiente sensibilidad de la geometría en los caudales altos. Sin embargo, en las zonas alejadas del flujo complejo en los bloques, las soluciones 2D y 3D fueron 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. Analizando los campos hidráulicos en 22 secciones transversales representativas de 400 m de río, encuentran algunas ubicaciones con predicciones 2D y 3D equiparables. Incluso detectan tramos muy uniformes en los que las soluciones 2D/3D resultan comparables a las 1D. En consecuencia, las investigaciones demuestran que la exactitud y representatividad hidráulica aumentan con la dimensionalidad del modelo numérico utilizado, si bien la elección sensata del método más conveniente para un estudio ecohidráulico concreto viene determinada por la valoración técnica del balance entre la confiabilidad y el costo (Díez Hernández y Burbano Burbano, 2007).

Respecto a los modelos de preferencia biológica, existen alternativas exitosas en contextos donde la información disponible sobre el comportamiento selectivo de los organismos objetivo es imprecisa o confusa (Jorde *et al.*, 2001; Schneider y Jorde, 2003). A diferencia de otras técnicas 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, alta) se evalúa mediante las "funciones de membresía" (figura 7). El valor numérico de 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).

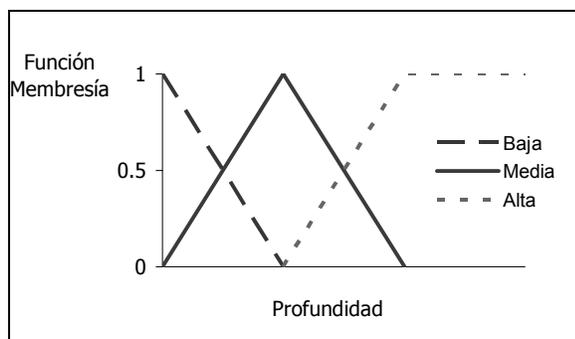


Figura 7. Ilustración de una delineación difusa de criterios de preferencia mediante clases de calidad de hábitat (baja, media y alta) para una variable explicativa (profundidad). Adaptado de Shneider y Jorde (2003)

## Ámbito práctico del modelamiento ecohidráulico

Los principios regidores de la conservación o restauración de un ecosistema fluvial 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: 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 son diversos en función del contexto social y económico, desde recuperar la calidad del agua para usos consuntivos, hasta mantener una producción piscícola, asegurar la navegabilidad, mejorar la estética, o proteger la biodiversidad nativa. Pero si se procura una gestión verdaderamente ambiental basada en el autosostenimiento, se deberán salvaguardar los procesos y condiciones que determinan la estructura, composición y 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 IFIM, *Instream Flow Incremental Methodology* (Bovee, 1982), la cual interpreta espacial y temporalmente los patrones de calidad de microhábitat asociados a diferentes escenarios hidrológicos o hidráulicos (Figura 6; ver Díez Hernández, 2006b). 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 (Pollino *et al.*, 2006; Coysh *et al.*, 2007). En el ámbito Iberoamericano, IFIM se viene aplicando desde hace más de quince años en ríos de España (García de Jalón *et al.*, 1989), y posteriormente en Chile (Parra *et al.*, 2001) y Argentina (Bechara *et al.*, 2005). Las primeras simulaciones IFIM en Colombia (Díez Hernández, 2006a; Díez Hernández y Ruiz Cobo, 2007) resultan prometedoras y suscitan líneas de investigación interesantes para proteger la importante biodiversidad de sus hidrosistemas continentales.

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 preci-

sión necesarias para evaluar la efectividad de distintas alternativas.

El modelamiento de 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 ni explicar la presencia o ausencia de una especie. Generalmente, el análisis del hábitat no incorpora explícitamente las dinámicas ecológicas subyacentes a los criterios de preferencia (fundamentados en información de campo), por lo que los ecólogos fluviales más estrictos pueden considerarlo como una simplificación hidroingenieril excesiva (Shirvell, 1986). 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, el ecohidráulico procede bajo la premisa de 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 concreta. 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 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 les deslumbra la vistosidad de las soluciones informáticas distribuidas del flujo y del microhábitat característica de los sistemas 2D/3D (efecto *voilà*), porque saben que su confiabilidad real viene determinada por la calidad de la información introducida.

## Agradecimientos

La Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) ha respaldado esta investigación mediante una beca Postdoctoral: Universidad Nacional de Colombia (UNC)- Bogotá, Dpto. de Ingeniería Civil y Agrícola. El Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la UNC - Bogotá ha facilitado los datos del levantamiento hidrotopográfico del tramo ilustrativo del río Magdalena.

## Bibliografía

- Allan, J. D., *Stream Ecology Structure and function of running waters.*, 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., 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 pp.
- Bechara, J. A., Alabarce, M. N., Ruiz Díaz, F. J., *Informe final de la primera etapa del proyecto GEF-PNUD ARG02/G35.* Instituto de Ictiología del Nordeste., Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, Argentina, 2005.
- Boudreau, P., Bourgeois, G., Leclerc, M., Belzile, L., *Two-dimensional habitat model validation based on spatial fish distribution: Application to juvenile atlantic salmon of Moisie River (Québec, Canada).*, Proceedings of the 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 11, 1978, pp.340-346.
- Bovee, K. D., *A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology.*, Instream Flow Information Paper No. 12, U.S. Fish and Wildlife Service, Fort Collins, Colorado, 1982.
- Bovee, K. D., *Development and Evaluation of Habitat Suitability Criteria for Use in the Instream Flow Incremental Methodology.* Instream Flow Paper No. 21, Fort Collins, Colorado, EEUU, 1986.
- CER (Center for Ecohydraulic Research)., University of Idaho, EEUU. [www.uidaho.edu/ecohydraulics/](http://www.uidaho.edu/ecohydraulics/).
- Coysh, J., Marshall, J., McGregor, G., Marshall, C., *An ecohydraulic approach to flow regime assessment.*, Proc.VI International Symposium on Ecohydraulics, Christchurch, New Zealand, 2007.
- Davis-Colley, R. J., Vant, W. N., Smith, R. G., *Colour and clarity of natural waters: science and management of optical water quality.*, Ellis Horwood, New York, 1993.
- De Nicola, D. M., McIntire, C. D., *Effects of substrate relief on the distribution of periphyton in laboratory streams.*, Journal of Phycology, 26, 1990, pp. 624-633.
- Diez-Hernández, J. M., *Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en la ordenación sostenible de cuencas hidrográficas.* Ing. Invesig., Vol. 26, No. 10, 2006a, pp. 61-70.
- Diez-Hernández, J. M., *Modelación Fluvial Multidimensional (1D-2D) Aplicada al Cálculo de Caudales Ecológicos.*, Actas XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, 15-16/09/2006, Popayán, 2006b.
- Diez-Hernández, J. M., Burbano Burbano, L., *Revisión de los modelos eco-hidráulicos uni-dimensionales y bi-dimensionales en corrientes fluviales.*, Avances en Recursos Hidráulicos, 15, 2007, pp. 75-88.
- Diez-Hernández, J. M., Ruiz Cobo, D. H., *Determinación de caudales ambientales confiables en Colombia: el ejemplo del Río Palacé (Cauca).*, Gestión y Ambiente, Vol. 10, No. 1, 2007, pp. 153-166.

- Diplas, P., Shen, Y., Use of two- and three-dimensional hydraulic models for addressing ecological aspects of stream flows., Proc. Sixth International Symposium on Ecohydraulics, 18-23/02/2007, Christchurch, New Zealand, 2007.
- Dudgeon, D., Arthington, A. H., Gessner, M. O., Fresh-water biodiversity: importance, status, and conservation challenges., *Biological Reviews*, 81, 2006, pp.163-182.
- García de Jalón, D., Casado, C., Mayo, M., Villeta, C., Estimación de caudales ecológicos mínimos para el río Ojailén a su paso por Puertollano., INTECSA. 1989.
- Goring, D. G., Biggs, B. J. F., The effect of velocity and turbulence on the growth of periphyton in a cobble-bed stream: The 5-stone experiment., Proceedings of the 2nd IAHR International Symposium on Habitat Hydraulics, 1996, pp. A239-A250.
- Habersack, H. M., Hydraulic Simulation of Natural River Sections – Field study and numerical model verification., Proceedings of IAHR Congress, Graz, Alemania, 1999.
- Hardy, T. B., Addley, R. C., Instream Flow Assessment Modelling: Combining Physical and Behavioural Based Approaches., *Canadian Water Resources Journal*, 28 (2), 2003, pp. 273-282.
- Hauer, D., Tritthart, M., Unfer, G., Schmutz, S., Habersack, H., The necessity of modeling the stability of spawning grounds between 1D, 2D and 3D numerical models., Proc. Sixth International Symposium on Ecohydraulics, 18-23/02/2007, Christchurch, New Zealand, 2007.
- Henriksen, J., James, A., Heasley, J., Kennen, J.G. y Niewsand, S. User's manual for the Hydroecological Integrity Assessment Process. USGS, File Report 2006-1093, 2006.
- James, C. S., Kleynhans, M. T., Birkhead, A.L., Predicting hydro-ecological impact in a seasonal floodplain., Proceedings 5th International Symposium on Ecohydraulics, Madrid, 2004, pp. 1373-1378.
- James, C. S., Thoms, M. C., The Natural Flow Paradigm Revisited., Proc. Sixth International Symposium on Ecohydraulics, 18-23/02/2007, Christchurch, New Zealand, 2007.
- Jorde, D., Scheneider, M., Peter, A., Zoellner, F., Fuzzy based models for the evaluation of fish habitat quality., Proceedings 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics, 2001.
- Jowett, I. G., River hydraulics and Instream habitat modeling for river biota., En: *Waters of New Zealand*, Moseley, M.P. (ed.), New Zealand Hydrological Society, 1992, pp. 249-263
- Katopodis, C., Case studies of instream flow modelling for fish habitat in Canadian Prairie Rivers., Special issue of the *Canadian Water Resources Journal*, Vol. 28, No. 2, 2003, pp. 199-216.
- Klonidis, A. T., Soulis, J. V., An implicit scheme for two-dimensional free-surface flow calculation., *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, No. 4, 2002, pp. 25-34.
- Koboltschnig, G., Mader, H., Mayr, P., WG1a Raw Data Sub-group: Physical Habitat and instrumentation., European Aquatic Modelling Network (EAMN) COST Action 626, 2002.
- Leclerc, M., Ecohydraulics, last frontier for fluvial hydraulics: research challenges and multidisciplinary perspectives., Proceedings of RiverFlow 2002 Conference, Louvain-la-Neuve, Belgium, 2002.
- Leclerc, M., Boudreault, P., Bechara, J., Corfa, G., Two dimensional hydrodynamic modeling: a neglected tool in the Instream Flow Incremental Methodology., *Transactions American Fisheries Society*, Vol. 124, No. 5, 1995, pp. 645-662.
- Leclerc, M. A., Bechara, J., State-of-the-art and perspectives of habitat modeling for determining conservation flows., *Canadian Water Resources Journal*, Vol. 28, No. 2, 2003, pp.135-172.
- McBride, G. G., Cooke, J. G., Cooper, A. B., Smith, C. M., Optimising the compensation flow requirements of a river impounded for water supply., En: *Rivers for our Future*, Department of Irrigation and Drainage, Kuala Lumpur, Malasya, 1993, pp. 4B/1/1-15.g.
- Milhous, R. T., Relating Streamflows to the Health of an Aquatic Ecosystem., Proc. Sixth International Symposium on Ecohydraulics, 18-23/02/2007, Christchurch, New Zealand, 2007.
- Muller, G. A., Marsh, P.C., Lost a desert river and its native fishes: a historical perspective of the lower Colorado River., USGS Information and Technology Report USGS/BRD/ITR-2002-0010, 2002.
- Nature Conservancy., Indicators of Hydrologic Alteration., <http://www.nature.org>, 2007.
- Olsen, N.R.B. Hydroinformatics, fluvial hydraulics and limnology. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Noruega, 2002.
- Panayiotis, D., Shen, Y., Use of two and three-dimensional hydraulic models for addressing ecological aspects of the stream flows., Proc. Sixth International Symposium on Ecohydraulics, 18-23/02/2007, Christchurch, New Zealand, 2007.
- Parasiewicz, P., MesoHABSIM: A concept for application of instream flow models in river restoration planning., *Fisheries*, Vol. 26, No. 9, 2001, pp. 6-13.
- Parra, O., Valdovinos, C., Habit, E., Determinación del caudal mínimo ecológico del proyecto hidroeléctrico Quilleco., Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 2001.
- Poff, N. L., Voelz, N. J., Ward, J. V., Algal colonisation under four experimentally-controlled current regimes., *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 46, 1990, pp.1805-1818.
- Poff, N. L., Natural Flow Regime as paradigm for river restoration., Proceedings Fifth International Symposium on Ecohydraulics, 12-17/09/2004, Madrid, España, 2004.
- Pollino, C. A., Woodberry, O., Nicholson, A., Korb, K., Hart, B. T., Parameterisation and evaluation of Bayesian network in risk assessment., *Environmental Modelling and Software*, 23, 2006, pp. 145-162.

- Schneider, M., Jorde, K., Fuzzy-ruled based models for the evaluation of fish habitat quality and Instream flow assessment., Proceedings of the IFIM User's Workshop, Fort Collins, Colorado, 1-5 Julio, 2003.
- Secretan, Y., Leclerc, M. Duchesne, S., Heniche, M., Une méthodologie de modélisation pour la simulation hydrodynamique bidimensionnelle., Revue des Sciences de l'eau, 14(2), 2001, pp. 187-212.
- Shirvell, C. S., Pitfalls of physical habitat simulation in the Instream Flow Incremental Methodology., Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 1460, 1986.
- Steffler, P., Sandelin, J., Yang, Z., R2Mesh versión 2.03. University of Alberta, Alberta, Canadá, 2006.
- Zalewski, M., Flood pulses and river ecosystem robustness., International Association of Hydrological Sciences (IAHS), Vol. 305, 2006, pp.143-154.
- Zang, Y., Jia, Y., CCHE2D Mesh Generator Versión 2.6., National Center for Computational Hydroscience and Engineer, University of Mississippi, EEUU, 2005.