

# AVANCES Y ASPECTOS NO RESUELTOS EN LA ESTIMACIÓN DE REGÍMENES DE CAUDALES ECOLÓGICOS

Domingo Baeza Sanz & Diego García del Jalón

*E.T.S.I. Montes.*

## 1 Resumen

Existen varias metodologías para el cálculo de caudales ecológicos, cada una de ellas será más válida en función de los objetivos que se quieran conseguir, una de las que más desarrollo tiene es la que liga las exigencias de hábitat de los peces con los cambios de caudal, denominada IFIM, esta parte de un modelo hidráulico que en la actualidad ha sido mejorado pudiéndose trabajar en dos dimensiones.

Una vez conocido el caudal mínimo ecológico se deberán calcular otros para que el régimen del río fluctúe, tal y como lo hace en condiciones naturales, en este trabajo se discuten los procedimientos para conseguir a partir de un valor mínimo de caudal un régimen para todo el año, también se propone una forma para contemplar la variación interanual, con distintos regímenes anuales para los años hidrológicamente más húmedos o más secos.

## 2 Introducción

Una gran longitud de tramos fluviales se encuentran intervenidos, regulados y modificada la cantidad de agua que circula por ellos, para conservar parte de su identidad se necesita que, al menos circulen, unos caudales mínimos, que normalmente denominamos *caudales ecológicos*. Los caudales ecológicos, tendrían como finalidad ser capaces, de mantener el funcionamiento composición y estructura del ecosistema fluvial, que ese cauce contiene en condiciones similares a las naturales.

Por esta razón, la legislación actual establece la necesidad de fijar esos *caudales ecológicos mínimos*, como mal menor, y frenar la disminución y pérdida marcada de los valores naturales del ecosistema. Aunque la ley de Aguas obliga a las Confederaciones a fijar unos caudales ecológicos y estas así lo han reflejado en sus respectivos Planes Hidrológicos, su definición aún no está fijada. Los caudales ecológicos se pueden justificar para cumplir múltiples funciones: sostener la vida de la ribera, preservar especies autóctonas de fauna y flora, para conservar la pesca, para mantener la belleza de un paisaje natural, o para mantener tramos de interés científico. Dentro de los métodos de cálculo de caudales ecológicos, podríamos pensar que hay algunos que se ajustan mejor que otros, a uno de estos objetivos concretos.

En la práctica la fijación de unos caudales ecológicos se hace basándose en dos tipos de criterios:

- 1) análisis de los regímenes de caudales históricos
- 2) análisis de la variación del hábitat con los caudales circulantes

El primer criterio estudia en especial los estiajes naturales de los ríos en la idea de que las comunidades fluviales han evolucionado sometidos a determinados tipos de regímenes de caudales y por tanto sus ciclos biológicos y requerimientos ecológicos están adaptados a las variaciones estacionales propias de dicho régimen. Así mismo, están adaptadas a tolerar unos caudales mínimos durante un estío mas o menos largo, e incluso pueden tolerar caudales muy exigüos durante uno o varios días, que obviamente no pueden mantener durante periodos largos a los que no estén adaptados. En la actualidad se está trabajando en esta línea en la cuenca del Ebro (Palau y Alcazar, 1996) y en la del Tajo (Baeza y García de Jalón, 1998).

El segundo criterio, desarrollado hace tiempo (Stalnaker, 1979 ; Bovee, 1982) principalmente a través de la metodología IFIM-PHABSIM (o similares), y cuya utilización se generalizó en todo el mundo. Este criterio liga las exigencias de hábitat de las especies fluviales, con las variaciones de las características de éste en función de los caudales circulantes.

Con cualquiera de los dos criterios que se utilice los que se obtiene son unos caudales ecológicos básicos, que representan estimaciones de las condiciones límites de tolerancia a la escasez de caudal, y serían los umbrales de la resiliencia de la comunidad.

La potencia de cálculo de los actuales ordenadores, y el desarrollo de nuevos programas hidráulicos, permite en la actualidad un mejor conocimiento de la dinámica fluvial y una simulación más precisa, actualmente se puede trabajar con la técnica IFIM, estudiando el río en dos dimensiones, gracias al programa RIVER-2D con el que estamos trabajando nuestro grupo últimamente, en aquellos casos en los que creemos que la mejor opción es identificar el hábitat de las especies piscícolas.

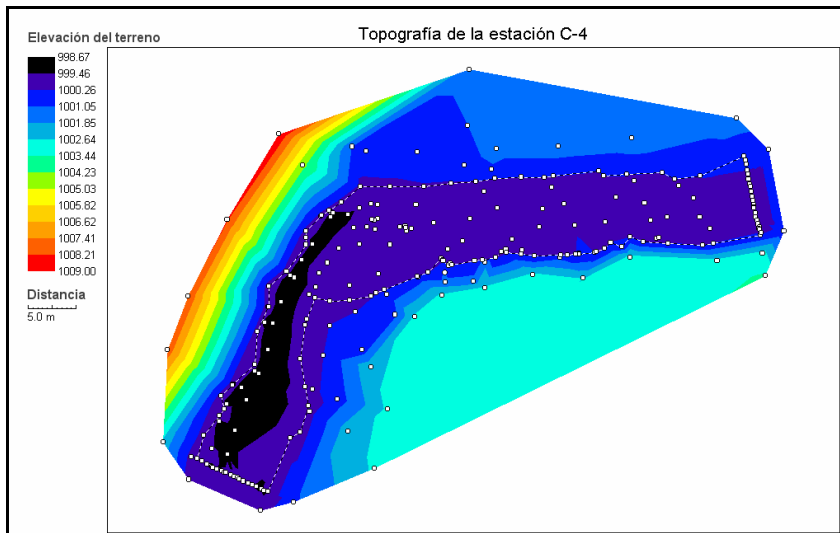
Para ilustrar este nuevo sistema presentamos el ejemplo de uno de nuestros trabajos llevado a cabo en el río Castril (Granada) y en alguno de sus afluentes. El trabajo de campo para la estimación del régimen de caudales ecológicos se estructuró en dos campañas de muestreo. En la primera, en junio de 2001, y la segunda campaña, en enero de 2002.

El modelo en dos dimensiones es más útil en estudios donde es importante la distribución local detallada de profundidades y velocidades, como ocurre en el caso de la evaluación del hábitat de los peces (Steffler *et al.*, 2.000).

La metodología empleada incluye la caracterización física del cauce, como suministrador de hábitat piscícola; la simulación hidráulica, relacionando valores de caudal con superficies de hábitat efectivo; y las curvas de preferencia de las especies piscícolas seleccionadas, que se definen para cada una de las variables hidráulicas que determinan el hábitat fluvial y reflejan el rango de dichas variables más adecuado para cada etapa de desarrollo de las mismas.

El trabajo más complejo de este sistema es aportar los datos físicos del cauce que permiten llevar a cabo la simulación hidráulica, para esto, se partió de un levantamiento topográfico de cada una de las estaciones de muestreo, a partir del cual se ha obtenido: la descripción morfológica del cauce; la granulometría del sustrato para estimar su rugosidad; el caudal circulante medido directamente con correntímetro; y las dimensiones de la lámina de agua en cada tramo, correspondiente al caudal circulante en el momento del aforo.

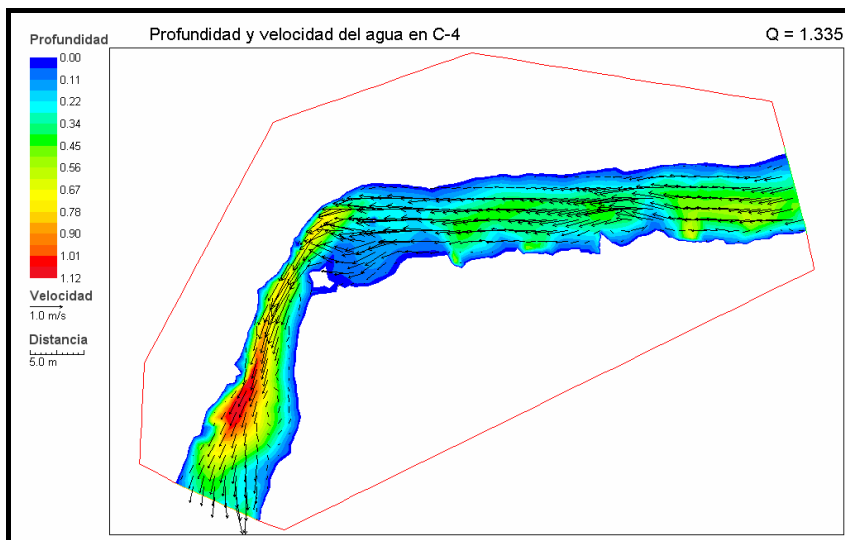
Una vez que ese cuenta con estos datos se introducen en el programa y el proporciona una salida, que tiene el aspecto de la siguiente figura, donde se representa, con la mayor precisión la morfología del cauce, en un tramo curvo de unos 200 m de longitud.



**Figura 1.** Topografía de un tramo del río Castril, puntos tomados, secciones de entrada y salida, interpretación dada por el programa River 2D.

Una vez que se tiene esta información, se simulan las condiciones hidráulicas para diferentes caudales. En cada tramo estudiado la simulación ha sido realizada con diferentes valores de caudal, considerando incrementos sucesivos de caudal dentro del rango que se conoce de los caudales naturales que circulan por el tramo.

Con dicha simulación se puede visualizar de manera gráfica la evolución del nivel de las aguas, la inundación progresiva de las orillas y, lo que es más importante, el modo en que varía la velocidad y la profundidad del agua en cada una de las celdas establecidas por el modelo. En la siguiente figura se aprecia la solución dada por el programa para el mismo tramo, en el que se representan las direcciones de flujo, velocidades y profundidades para un caudal de  $1,335 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 2.** Resultado de la simulación realizada por el programa hidráulico River 2D, para un caudal de  $1,335 \text{ m}^3/\text{s}$ ; se aprecian las velocidades y direcciones de flujo así como las profundidades del agua para ese caudal.

Así se puede conocer posteriormente, mediante la aplicación de las funciones de preferencia, qué área del tramo es susceptible de ser habitada por las especies estudiadas. Repitiendo esta operación con varios caudales, obtendremos una relación entre el área habitable y el valor de los caudales, pudiendo elegir aquél caudal mínimo que no supone una gran pérdida de habitabilidad del tramo para las especies, y recomendando este como caudal mínimo ecológico.

### 3 El establecimiento del régimen de caudales ecológicos

Los caudales en un río no son fijos sino que cambian en las estaciones como respuesta a las diferentes entradas, principalmente la precipitación, a la pérdida de agua por evaporación, que es diferente en función de la inclinación del sol, la latitud y la vegetación en la cuenca y la regulación por el suelo y la formación geológica; las especies que habitan el río tienen diferentes exigencias de hábitat y de caudales circulantes a lo largo del año, debido a que están adaptados a esta variación.

Por esta razón cualquier medida de restauración y de restablecimiento de la calidad óptima del medio fluvial no determinará un valor único de caudal sino un régimen de caudales, con el fin de establecer un hábitat adecuado a las exigencias de caudales circulantes en los diferentes estados de desarrollo de las especies acuáticas.

En muchas ocasiones se habla de un único valor de caudal ecológico, desconocemos si esta simplificación tiene intencionalidad, persiguiendo una mayor sencillez en el establecimiento de la cantidad de agua que se debe reservar para lo que se denominan demandas ambientales; y se produce un cálculo muy simple del volumen a reservar con una sencilla multiplicación de este caudal por el espacio de tiempo en el que se quiera restablecer o mantener un caudal de agua controlado en el río en tramos regulados; sin intención de cambiarlo ni de hacerlo oscilar, como se produciría en un régimen de un río natural.

Como se ha visto en el ejemplo anterior en principio se calcula el caudal mínimo, sea por el método que sea, este será el valor que no podemos nunca disminuir, se puede denominar caudal ecológico mínimo o caudal base, y a partir de este se hace cambiar o oscilar en las estaciones para diseñar un régimen que nosotros consideremos va a facilitar el mantenimiento del río en unas condiciones aceptables, que han sido previamente definidas.

Es en este punto donde se estén incorporando en la actualidad mayor número de aportaciones y fórmulas, y donde parece que está peor resuelta la solución que se debe dar, sin ánimo de creer que la problemática de establecer el caudal mínimo esté del todo resuelta, parece que ya se tiene claro los tres tipos de metodologías que se pueden usar y hasta dónde puede llegar cada una, sólo faltaría ajustarlas o perfeccionarlas; sin embargo el cómo se hace fluctuar el caudal a lo largo de los días del año no se ha terminado de matizar, presentando tendencias que pueden llevar a soluciones muy dispares.

Actualmente los trabajos que se han escrito hasta ahora apuestan por alguna de las siguientes cuatro soluciones:

- Adaptar las variaciones de caudal a las exigencias de este en función de las necesidades de agua de las especies en las épocas más críticas, la freza, las migraciones, la cantidad de oxígeno disuelto en algunas estaciones.
- Utilizar las oscilaciones del régimen que se producen de forma natural en el río, estas se pueden conocer si se disponen de aforos.
- Identificar parámetros hidrológicos del régimen de interés ecológico, como la magnitud, duración y frecuencia de las avenidas y estiajes, o la constancia y predecibilidad de los caudales, y tratar de mantenerlos dentro de unos intervalos, que creamos que son los más similares a los naturales, o a los que soportan las especies.

- Elaborar un régimen por bloques, que pueden ser mensuales o de periodos críticos del hidrograma del río, en los que un grupo de especialistas aporta lo que cada grupo biológico o cada componente del ecosistema necesitaría como mínimo para que este siguiera funcionando sin graves alteraciones, es lo que se viene denominando BBM (Building Block Methodology)

En aquellos tramos de gran interés piscícola los regímenes se pueden vincular a las necesidades de los peces dominantes o de mayor interés, así los periodos de freza y de desarrollo de los embriones exigen caudales determinados sin crecidas, igualmente el verano con aguas más cálidas y menos oxígeno puede ser una época crítica para los salmónidos.

De esta forma en los ríos trucheros los meses de Diciembre a Marzo, serían época de freza y se necesitarían unos caudales para que esta se produzca sin problemas, incrementando posiblemente los valores de caudal mínimo ecológico, así también en el estiaje ( Julio-Septiembre) se deberá mantener un caudal alto que permita una óptima oxigenación de las aguas; en el caso de los ciprínidos la época de reproducción (Abril a Junio) es el periodo crítico y que es cuando se necesita más caudal ( García de Jalón y Guido Smidt, 1998).

Basado en las necesidades de caudales para los peces se llegan a definir cuatro tipos de caudales ecológicos (Gonzalez del Tánago y García de Jalón, 1995); el caudal mínimo absoluto, el caudal mínimo de estiaje, el caudal mínimo óptimo y el caudal aconsejable, este último se establece si se quiere conservar la población truchera y se basa en la relación que existe entre las variaciones de caudal que condiciona el valor del hábitat de los peces y las poblaciones de peces, en este caso se necesitan evaluaciones de la poblaciones de peces para distintos caudales, se considera que una población truchera tiene una biomasa buena si la densidad es de 20-30 gr/m<sup>2</sup> en un tramo de Rhithron.

Para la aplicación de este segundo criterio se necesita un conocimiento de los tramos de ríos a restaurar y de sus poblaciones pesqueras, un lujo que solamente nos podemos permitir en las zonas de alto interés de conservación o de mantenimiento de la fauna. Otro de los problemas es una posible incompatibilidad entre las exigencias de caudales de diferentes peces que puedan vivir en el mismo río, o que debido a que la diversidad de peces es muy grande, para que todos se reproduzcan y completen sus ciclos biológicos adecuadamente, se deban imponer caudales altos durante todo el año.

Ejemplos del segundo tipo han sido propuestos en nuestro país, basado en los caudales medios mensuales, con estos se elabora un índice que es el cociente entre el caudal medio de cada mes y el del mes de menor caudal, este índice servirá para multiplicar el caudal ecológico mínimo en cada mes, y de esta forma sacar 12 valores para establecer un régimen de caudales mensual ( Palau y Alcazar, 1998, García del Jalón et al, 1997, y Baeza, 2002).

Este método basado en las oscilaciones del caudal medio mensual puede simplificar la variabilidad de caudales, pues la media mensual es un valor que atenúa mucho los valores extremos, y en ríos con una gran variedad de caudales, muy torrenciales puede eliminarse una de las características más representativas de su hábitat.

Un parámetro muy utilizado para tipificar los tipos de regímenes es el coeficiente de variación intraanual, que es la varianza de los caudales diarios en el año partido entre el caudal medio, este valor es muy representativo del régimen de cada río y diferencia muy bien los regímenes constantes o atenuados de los torrenciales.

En la siguiente tabla se encuentran los coeficientes (**Cvintra**) que hemos calculado en ríos de la cuenca del Tajo, se pueden obtener valores muy diferentes dentro de los ríos de una de nuestras grandes cuencas, proponemos que de alguna forma este comportamiento debería de reflejarse en la variación del régimen de caudales en el río, bien afectando al índice mensual o aplicando un valor más extremo en los caudales altos del río, en algunos momentos del año, para que permanezca el carácter torrencial de los ríos con una alta variabilidad intraanual.

**Tabla 1. Valores encontrados del coeficiente de Variación intranual en 25 ríos del centro peninsular.**

Ríos	Cvintra	Ríos	CVintra
		Bujalaro	0,92
Gallo	0,66	Lozoya	1,04
Escabas	0,90	Alberche	1,16
Trabaque	1,24	Navalueng	1,50
Mayor	0,82	Jerte	1,37
Guadamejud	1,66	Cofio	1,85
Guadiela	0,81	Alagon	2,16
Tajo	1,25	Cuerpo de hombre	1,34
Tajuna	0,79	Tiétar	1,94
Dulce	0,59	Rosarito	1,64
Henares	1,62	Cuernacabras	2,05
Perales	1,91	Ibor	1,83
Almonte	2,24	Cedena	1,63

En esta tabla se puede apreciar que ríos como el Alagón ,Almonte o el Cuernacabras, verían modificado de una manera muy apreciable su coeficiente de variación, si se estableciera un régimen de caudales, con sólo las medias mensuales. Otro de los problemas de este método de los índices mensuales es que debido a la gran torrencialidad de nuestro ríos, las diferencias entre el caudal medio del mes seco y los de los meses más húmedos es muy grande, lo que hace que al dividir los últimos entre el primero se obtengan valores para el índice de esos meses muy alto, que hacen que se diseñe un régimen ecológico para estos meses con valores tan grandes que prácticamente no se deje agua para otros usos, por esto en algunos casos se ha propuesto atenuar los índices mensuales con algunas operaciones matemáticas (Palau, 1998)

El siguiente grupo de métodos se obtiene siguiendo las recomendaciones del método denominado IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) que ha sido expuesto en tres trabajos científicos por Richter et al, 1996. Estos autores usan en su método 32 diferentes parámetros hidrológicos, organizados en 5 grupos, que caracterizan estadísticamente las variaciones dentro de los años registrados de los acontecimientos con más significado ecológico del comportamiento de los caudales que influyen en el ecosistema acuático y de ribera. Los datos de estos valores se obtiene del análisis de los registros de las estaciones de aforo. Una vez analizados estos parámetros se observa cual ha sido su variación natural en el rango de años estudiado, estableciendo un intervalo de variación natural, que partiendo de alguna medida centralizadora, normalmente la media, oscile hacia arriba y hacia abajo un rango que se considere dentro de lo que sucede en acontecimientos naturales, por ejemplo este rango puede ir desde el valor medio medido más la desviación típica y menos la desviación típica.

Al establecer el régimen se trataría de que los nuevos valores de los parámetros estudiados, en el régimen de caudales ecológicos, entrara dentro de ese rango de variación que consideramos natural, es evidente que los valores se van a modificar en el nuevo régimen, pero esas modificaciones no deben ser tan extremas, como para que los organismos vivos no puedan sobreponerse a ellas, estamos hablando de mantener en valores similares a los naturales, el momento y la frecuencia de los caudales altos y bajos, y aunque con más dificultad las magnitudes de estos, el rango de variación y la frecuencia de las condiciones de cantidad de agua en el cauce.

Este método ha sido aplicado a la cuenca del río Roanoke en North Carolina por el grupo que ha propuesto la idea, para ver la alteración en los parámetros frente a las condiciones anteriores, que ha supuesto la construcción de una presa, nuestro grupo también ha aplicado este método en varios ríos de la cuenca del Tajo.

En cualquiera de los dos casos, sólo se ha diseñado el régimen y los valores a mantener, pero no se ha aplicado en los tramos afectados, sin embargo aunque utilizando otros criterios pero siguiendo esta filosofía, justificando el establecimiento de diferentes tipos de variación anual de los caudales, en el río Kissimmee en Estados Unidos, se ha diseñado un régimen para restaurar la cuenca de este río, en el que se pretende que el agua periódicamente inunde la llanura por la que discurre, aportando sedimentos y nutrientes a esta y manteniendo durante un largo periodo de tiempo el territorio húmedo; a diferencia de lo que ocurre con el régimen regulado actual, en el que se mantiene un caudal canalizado y continuo durante todo el año (Toth et al., 1997). Tratando por tanto de mantener en su estado natural algunos parámetros hidrológicos que tienen especial significado ecológico.

Por último creemos que la más completa metodología que se ha establecido hasta el momento es la BBF, que ha sido originada en Sudáfrica y Australia (Arthington *et al*, 1992, Tharme y King, 1998), se trata de métodos más holísticos, en los que no se considera sólo las necesidades de una especie o unas pocas especies, ni de el comportamiento hidrológico del río sino que se consideran un grupo más amplio de aspectos que contemplan componentes del biotopo y de la biocenosis del ecosistema completo.

El origen del nombre viene dado porque el régimen se divide en varios componentes o bloques, uno de ellos es el baseflow que recoge los caudales bajos, y sucesivamente se van dividiendo en varios componentes hasta llegar a las características de los caudales de avenida.

Las dos principales cualidades de este tipo de trabajo son por un lado el grupo de técnicos que trabajan en el estudio, varios especialistas en biología y varios especialistas en ingeniería hidráulica, y por otro la preparación y el desarrollo de unas jornadas o seminarios conjuntos donde se ponen en común las ideas que se han obtenido por cada técnico hasta el momento.

La secuencia de actividades se divide en tres:

- La primera es la preparación de las jornadas, en este tiempo se expone a los expertos la situación, se trata de que cada uno de ellos recopile toda la información disponible sobre la zona a estudiar y se haga una idea de la problemática que hay en el río o de la que se puede presentar si se lleva a cabo un proyecto en él. Para estudiar el estado actual del río

se utilizan fotografías aéreas o un vuelo en helicóptero durante el estiaje. En este periodo también se delimitan cuales van a ser los tramos representativos que se van a elegir para realizar las parcelas experimentales. Después se realizan todos los estudios necesarios, por tramos o secciones representativas, que incluyen un análisis hidráulico de las secciones, características geomorfológicas, química del agua, parámetros hidrológicos relevantes, aspectos sociales de necesidades hídricas y estudios de fauna y vegetación.

- En la segunda parte se realizan las jornadas de puesta en común, en ellas los grupos de especialistas exponen sus conclusiones, para cada uno de los tramos o secciones estudiadas, después diseña cual es a su juicio el régimen para que el aspecto que ellos han estudiado no se deteriore, se empieza por el bloque de los caudales bajos y se diseña totalmente hasta los más altos, definiendo en cada bloque, magnitud, frecuencia, etc. Estos datos son analizados en cada sección por el especialista en hidráulica para ver que implican esos caudales en términos de profundidad, perímetro mojado, velocidad o área inundada. Una vez que cada especialista hace sus correcciones en función de los resultados hidráulicos, se diseña el régimen mes a mes y se compara con el hidrograma natural y el actual, para observar que es un régimen que puede establecerse en la realidad, así como se comparan los regímenes de cada tramo, en el caso de ser del mismo río para comprobar que no son incompatibles entre si.
- Por último después de obtenido el régimen ecológico final, se introduce este en un análisis hidrológico de gestión, para comprobar que no entra en conflicto con las necesidades de agua de los otros usuarios del río. En caso de conflicto se puede rediseñar el régimen, para que cumpla con las necesidades de abastecimientos, y con esas nuevas condiciones volver a consultar a los expertos, de que forma esa disminución de los aportes de agua en alguno de los bloques, puede afectar a la integridad del ecosistema, rediseñando nuevamente por parte de estos el régimen hasta llegar a un consenso.

Esta metodología como se puede ver es muy completa, entre los años 1991 y 1996 se ha realizado con sus correspondientes grupos de trabajo en 15 ríos de Australia y Sudáfrica, en otros países la financiación puede ser un problema que frene la aplicación de algo parecido, pero parece que este es el camino hacia el que se debe tender si se quiere restaurar los ríos de una forma más ecosistémica. En ríos donde la acumulación de problemas es muy grande, no sólo falta agua sino que esta es de mala calidad, se debería al menos intentar establecer estudios que contemplen más de un punto de vista; en la actualidad nos encontramos trabajando en un tramo del río Tajo en Toledo, en donde la problemática es bastante complicada, no sólo el régimen está muy alterado, sino que la evidencia de contaminación en el río es grande y además desde un punto de vista geomorfológico y de conservación de la ribera el río está muy modificado, aunque las posibilidades de nuestro equipo no son tan grandes, como la de los grupos del BBF, vamos a tratar de aplicar un método que se acerque más a este, por eso estamos tratando de diseñar un régimen que no sólo optimice el hábitat de los peces, sino que conserve la vegetación de ribera y corrija en parte los problemas geomorfológicos que hemos encontrado.

### **Las fluctuaciones interanuales**

La torrencialidad de los regímenes de los ríos mediterráneos se refleja no solo en una fuerte oscilación estacional, sino también en una fuerte fluctuación interanual. Este hecho debe recogerse en la propuesta de régimen de caudales ecológico, puesto que las especies autóctonas han evolucionado sometidas al mismo, y en dichas condiciones son las mejor adaptadas y más competitivas (frente a otras introducidas, que son cada vez más numerosas). Por ello se deben considerar diferentes regímenes de caudales ecológicos según se trate de



años húmedos, años secos, e incluso años extremadamente secos. A continuación exponemos una propuesta de caudales que puede establecerse para solventar esta otra fuente de variación.

Con frecuencia el cálculo del Caudal Ecológico Básico conduce a un intervalo de indeterminación de caudales, cuyos valores extremos pueden tomarse de referencia de base para años húmedos (caudal más alto del intervalo) y años secos (el más bajo). El régimen ecológico en años secos o húmedos se puede definir, análogamente, tomando respectivamente de los intervalos calculados de oscilación, de los parámetros mensuales, los más extremos por abajo en el intervalo, como criterio base para los meses de los años de menor caudal, y los altos para los meses de los años de mayor caudal, y así les asignamos unos caudales proporcionales a la fluctuación natural mensual.

De esta forma tenemos un régimen de caudal ecológico menor para los años secos, que en el caso de los húmedos. Este régimen tiene una fluctuación similar a la que se da naturalmente durante los años secos, y en los meses de estiaje se aseguran unos caudales capaces de mantener suficiente hábitat para la supervivencia durante la sequía.

En ríos en que la torrencialidad es más acusada, se observa que la fluctuación estacional en su régimen natural sigue diferentes pautas en los años de lluvias normales con las que se dan en aquellas de sequía. En general, la fluctuación es menos acusada y los máximos mensuales tienden a retrasarse de Febrero-Marzo en los años húmedos a Marzo-Abril en los secos. Por la existencia de estas diferencias hemos adoptado en los Regímenes de Caudales Ecológicos Secos una pauta de fluctuación proporcional a la que ocurre naturalmente en los años secos. Para ello, se ha definido el Régimen Natural de los Años Secos como el determinado por el caudal medio mensual de la serie natural de los años secos, definiéndose estos últimos como aquellos cuyo caudal medio anual es menor que la mitad del módulo natural.

Para los años con sequía extraordinaria, se propone un régimen con caudales en los meses de estiaje iguales a los del régimen de años secos, y el resto del año con una fluctuación atenuada a la mitad de la fluctuación de los años secos. Con ello se pretende en estos años extremos hacer lo más compatible posible la demanda de agua (que resultará prioritaria puesto que se tratará principalmente de demanda de abastecimiento a poblaciones) con la demanda ecológica. El régimen de caudales ecológicos cede en los máximos que son totalmente almacenables por las obras de regulación hidráulica al encontrarse bastante vacías.

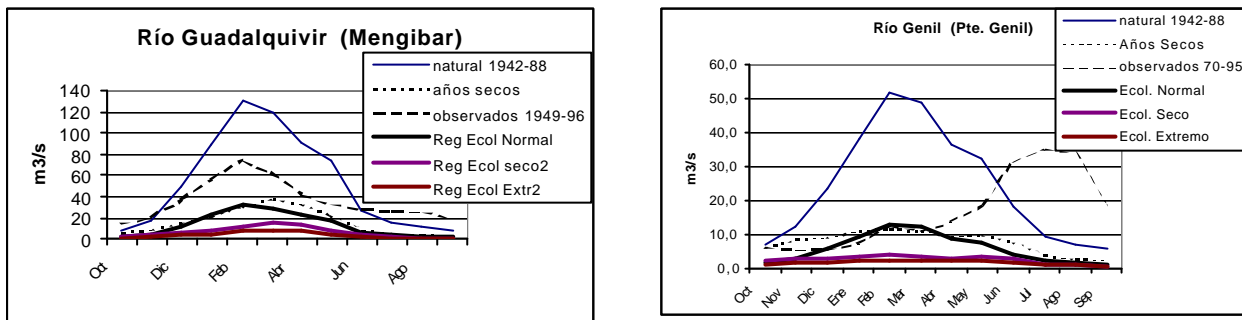
El régimen natural de caudales en ríos que drenan cuencas áridas además de ser bastante torrencial presenta generalmente estiajes muy acusados, alcanzando con frecuencia la sequía completa del cauce (ríos temporales). Debido a que la dimensión y la morfología de los cauces son perfiladas por los caudales 'generadores del cauce' o 'bankfull discharge' (asimilables a la 'avenida ordinaria'), mientras que, los caudales ecológicos básicos se determinan en función de esta morfología del cauce y del hábitat que supone, puede darse el caso de que los caudales de los meses de estiajes sean inferiores a los caudales mínimos básicos.

En estos ríos de régimen acusadamente torrencial hemos definido su régimen de caudales ecológicos respetando su estiaje natural, es decir en los meses en que sus caudales naturales son inferiores a los caudales mínimos básicos se toman los caudales naturales. En estos casos, la fluctuación en los restantes meses se hace, no proporcionalmente al mínimo mensual, sino proporcional al módulo de la serie.

**Tabla 2 Porcentajes del régimen de caudales naturales y del régimen observado medio, que los regímenes ecológico, mínimo y extremo representan**

Tramos	% de caudales naturales			% de caudales observados		
	Húmedo	Seco	Extremo	Húmedo	Seco	Extremo
<b>Guadalquivir (Mengivar)</b>	25	13	8	36	19	11
<b>Genil Puente Genil</b>	25	11	7	36	16	11

En la figura 3 se exponen los regímenes de caudales (natural, observado y ecológicos) en ríos mediterráneos. Si comparamos estos diferentes tipos de regímenes podremos evaluar su significado y costes de una gestión ambiental. Es de resaltar las grandes diferencias entre las pautas de fluctuación observado y los que debería de ser el régimen natural (río Genil). En la tabla nº 2 se exponen los porcentajes del régimen de caudales naturales y del régimen observado medio, que los regímenes ecológico, mínimo y extremo representan.



**Figura 3.-Regímenes de Caudales de medias mensuales en Mengibar(Río Guadalquivir), y en el río Genil, atendiendo a la serie natural (simulada), natural de años secos (media anual menor que la mitad del modulo), observados (regulado), y regímenes ecológicos diseñados para años húmedos, secos y extremos.**

Finalmente, quedaría por definir que se entiende por año húmedo, seco y extremadamente seco. En los ríos regulados mediante embalses podemos realizarlo en función de las existencias de agua en los embalses de la cuenca o subcuenca correspondiente al comienzo del año hidrológico. Se propone el siguiente criterio:

- Años Húmedos:** llenado embalses > 50 %
- Años Secos:** llenado embalses entre 25 - 50 %
- Años Extremos:** llenado embalses < 25 %

En el caso de los ríos sin infraestructura hidráulica reguladora se propone un criterio similar, en función de las precipitaciones habidas en la cuenca durante los dos años anteriores, según una media ponderada, y en relación con las precipitaciones medias de series de más de 25 años.

### **Fijación de avenidas de mantenimiento del cauce**

Las ocasiones en las que el río lleva más agua también pueden ser contempladas y establecer caudales ecológicos altos que sean capaces de cumplir las funciones que las crecidas de los

ríos producen, tales como remover los finos acumulados en el lecho, arrastrar vegetación acuática, detritus, aguas excesivamente salinas, o bien modificar la morfología del cauce y en el caso de inundaciones, mantener la cubierta vegetal de las riberas. Cuando se diseña un régimen ecológico de caudales estas avenidas no se suelen estimar, ya que se trata de emplear poco agua y se usan índices atenuadores como las medias mensuales, por lo que las avenidas desaparecen.

El cauce, y por lo tanto el hábitat que representa, se encuentra en equilibrio geomorfológico con los caudales que circulan por él. Por ello un régimen de caudales ecológicos debe tener en cuenta la existencia de avenidas de tal magnitud con frecuencias entre uno y dos años con objeto de mantener en buenas condiciones el sustrato del río y la vegetación riparia, adaptando asimismo dicho régimen a las necesidades de otras especies presentes en el ecosistema. En los ríos más torrenciales y que drenan cuencas áridas su frecuencia e intensidad puede ser mayor.

Para su calculo estricto habría que analizar la serie de caudales naturales y estudiar los valores máximos para periodos de recurrencias de 1,5 a dos años. Si el cauce se encuentra poco regulado o desde no hace muchos años, se pueden utilizar las secciones del cauce y determinar, utilizando el modelo hidráulico, el caudal que llena el cauce como la avenida ordinaria. Finalmente, como aproximación rápida se puede estimar este caudal en base a la media de los caudales máximos diarios de una serie de mas de diez años.

## **Bibliografía**

Baeza, D, 2002. Caracterización del régimen ecológico de caudales en ríos de la cuenca del Tajo basado en su regionalización hidrobiológica. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Forestal. ETSI de Montes Universidad Politécnica Madrid.

Baeza, D. y García de Jalón (1998) Caracterización del Régimen de Caudales en 16 ríos de la Cuenca del Tajo atendiendo a criterios biológicos. *Limnetica*. 13:69-78.

Bovee, K.D. 1982 *A Guide to Stream Habitat Analysis using the Instream Flow Incremental Methodology*. Instr. Flow Inf. Paper 12. USDI Fish and Wildl. Serv. Washington. 248 pp.

Garcia de Jalon, D. 1987 River Regulation in Spain. *Reg. Rivers: Res. & Mngt.* 1, 343-348.

Garcia de Jalon, D. 1990. Técnicas hidrobiológicas para la fijación de caudales ecológicos mínimos. En: *Libro homenaje al Profesor D. M. García de Viedma*. 183-196. A. Ramos, A. Notario & R. Baragaño (eds.). Fucovasa. UPM. Madrid.

García de Jalón y Schmidt, G. 1998. Manual práctico sobre minicentrales hidroeléctricas. AEMS ríos con vida. 87 pag.

Gonzalez del Tánago, M. y D. García de Jalón. 1995. Restauración de ríos y riberas. E. T. S.I. Montes. 319 pags

Palau, A. 1994 Los mal llamados caudales "ecológicos". Bases para una propuesta de cálculo. *Obra Pública* n?28 (Ríos II), 84-95.

Palau, A. y J. Alcazar 1996 The basic flow: An approach to calculate minimum environmental instream flows. Procs. 2<sup>nd</sup> Int. Symp. On Habitat Hydraulics. Vol. A: 547-558.

Richter, B.D., Baumgartner, J., Wigington, R. & Braun, p., 1997. How much water does a river need?. *Freshwater Biology* 37: 231-249

Steffler, P., 1999. Two-Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat. University of Alberta.

Stalnaker, C.B. 1979 The use of habitat structure preferenda for establishing flow regimens necessary for maintenance of fish habitat. En: *The Ecology of Regulated Rivers*. J.V. Ward y J. Stanford. 326-337. Plenum Press.

White, R.G. 1976 A methodology for recommending stream resource maintenance flows for large rivers. Procs. on Instream flow needs Symp. 376-386.