

**INFORME DE COAGRET SOBRE  
“CRITERIOS SOBRE LA IMPLANTACIÓN DE CAUDALES  
AMBIENTALES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL EBRO”  
ESQUEMA DE TEMAS IMPORTANTES  
PLAN HIDROLÓGICO (2007)**

Autor: María Dolores Bejarano Carrión  
Coordinador: Diego García de Jalón  
ETSI de Montes, Universidad Politécnica de Madrid  
Diciembre de 2007

La Coordinadora de Afectados por Grandes Embalses y Trasvases (COAGRET) presenta este informe a la Cuenca Hidrográfica del Ebro, con el objetivo de recoger la visión de los colectivos ecologistas y grupos de afectados por las obras hidráulicas en uno de los temas importantes que se plantean en la cuenca en materia de gestión de aguas a la hora de la elaboración del Plan Hidrológico de Cuenca, la determinación de caudales ambientales; y en cumplimiento del fomento de la participación activa de todas las partes interesadas dispuesto en la Directiva 2000/60/CE (Directiva Marco de Aguas).

Para la elaboración del informe, COAGRET ha contado con María Dolores Bejarano Carrión, de la Universidad Politécnica de Madrid, que ha trabajado bajo la supervisión de Diego García de Jalón.

## ÍNDICE

### Resumen

1.- Justificación de la importancia del tema.....	1
2.- Antecedentes. Metodologías existentes.....	4
3.- Aspectos del régimen hidrológico de importancia ecológica.....	5
4.-Propuesta metodológica para el cálculo del “régimen ecológico de caudales” en ríos de la Cuenca del Ebro.....	11
4.1.- Escala de cuenca: método hidrológico de los percentiles.....	13
4.1.1.- Cálculo del “régimen ecológico de caudales” en tramos fluviales con una serie de datos de caudales diarios naturales suficientemente larga	
4.1.2.- Cálculo del “régimen ecológico de caudales” para toda la Cuenca del Ebro basado en la caracterización regional de sus regímenes de caudales	
4.2.- Escala de tramo: método de simulación del hábitat.....	21
5.- Ejemplos.....	23
5.1.- Regímenes ecológicos a escala regional.....	23
5.2.- Regímenes ecológicos a escala de tramo fluvial.....	27
5.3.- Discusión.....	29
6.- Bibliografía.....	31
7.- Agradecimientos.....	33

### ANEXOS

La definición de **“regímenes ecológicos de caudales”** en la Cuenca del Ebro es imprescindible si se quiere preservar la **composición, estructura** y el **funcionamiento** de sus ecosistemas acuáticos y terrestres asociados, contribuyendo así a alcanzar el **buen estado o potencial ecológico** según la Directiva Europea Marco del Agua.

Los **aspectos del régimen hidrológico** de mayor influencia sobre los ecosistemas fluviales y que por tanto constituirán el **“régimen ecológico de caudales” (REQ)** son:

- **Caudal mínimo:** representa los umbrales de resiliencia de la comunidad.
- **Régimen de caudales:** representa las pautas de fluctuación que conservan al hábitat fluvial en todos los estados de desarrollo de las especies acuáticas.
- **Caudal máximo de estiaje:** representa la estimación de los caudales máximos tolerados por la fauna y flora en épocas de estiaje natural.
- **Avenidas de mantenimiento:** reorganizan la estructura de los cauces.
- **Caudal de acondicionamiento:** representa un incremento de caudal sobre el “caudal mínimo” que garantiza la protección de segmentos de especial interés.

En el cálculo de estos cinco parámetros hidrológicos se deben tener en cuenta: **magnitud, frecuencia, duración, época y tasas de cambio.**

Se proponen dos metodologías. **1) Método hidrológico a escala de cuenca.** Es susceptible de ser aplicado a cualquier punto de la cuenca sin atender a detalles. Se propone calcular el **“régimen ecológico de caudales” (REQ)** para cada tramo fluvial de la Cuenca del Ebro a partir de un **“régimen ecológico de caudales estandarizado” (REQE)** característico de cada tipología de caudal descrita para la cuenca. **2) Método de simulación del hábitat a escala de tramo.** Permite descender a las particularidades de cada tramo para adecuar el resultado de las características de fauna y flora de cada lugar. Se propone el estudio del **“hábitat potencial útil”** de una **“especie indicadora”** para distintos caudales circulantes mediante modelos de simulación del hábitat, para definir un “caudal mínimo” que conserve las comunidades acuáticas del tramo.

La reserva ecológica supone alrededor del 36% de la aportación anual natural total durante períodos normales y el 25% durante períodos secos en ríos pirenaicos, y es ligeramente inferior en el resto. Las dos metodologías se complementan, pero pueden aplicarse de forma independiente en función de los objetivos perseguidos. La aplicabilidad del método de los percentiles a ríos temporales es limitada.

## 1.- Justificación de la importancia del tema

La presencia de obras hidráulicas es una problemática muy extendida en nuestro país. En la actualidad, son pocos los ríos españoles cuyos caudales no están regulados artificialmente consecuencia de estas obras. No sólo las grandes fluctuaciones de nivel provocadas, sino también el desfase temporal en que ocurren respecto a la fenología natural, afectan profundamente a la fauna y flora que constituyen el ecosistema fluvial (Ward y Stanford, 1979; Petts, 1984).

La definición e implementación de los “caudales ecológicos” en ríos, regulados o no, se impone hoy como forma de recuperar o conservar respectivamente algunas de las características relevantes del régimen natural de caudales, de tal manera que se puedan restaurar o mantener tanto los componentes biofísicos como los procesos ecológicos de los ecosistemas acuáticos implicados (Arthington & Pusey, 2003).

En España (y a nivel mundial en general), existe **acuerdo** en la necesidad de restringir la utilización del agua del medio natural mediante la definición de “regímenes ecológicos de caudales”. Son indiscutibles **los objetivos** de: alcanzar el buen estado de las masas de agua, satisfacer las necesidades de conservación de los ecosistemas acuáticos, integrar el buen estado de los regímenes hidrológicos en las políticas sectoriales, y cumplir con los compromisos de nuestro país en relación a los textos legales firmados relacionados con la conservación de los ecosistemas acuáticos.

Por el contrario, **no existe homogeneidad a la hora de definir criterios** legales para el cálculo de “regímenes ecológicos de caudales” existiendo unos 10 criterios normativos distintos con solapes territoriales incluidos en algunos casos. Las primeras citas al “caudal mínimo” se hacen con el objetivo de facilitar el **paso de peces** (1942, legislación pesca fluvial) y de **dilución de los vertidos contaminantes** (1958, Reglamento de Policía de Aguas). Se habla de un caudal a respetar **para “usos” comunes, sanitarios o ecológicos en caso de ser necesario** en el Reglamento de Dominio Público Hidráulico aprobado por Real Decreto en 1986. Se configura **como una limitación general que se impone a los sistemas de explotación por razones de**

**protección del recurso y su entorno, así como los ecosistemas ligados a él**, en el Real Decreto por el que se aprueban los Planes Hidrológicos de Cuenca (PHC) de 1998 y en la reforma de la Ley de Aguas de 1999.

Las leyes de 2001 y 2005 del Plan Hidrológico Nacional, y el RD por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica (2007), aclaran la consideración de **limitación previa preferente** (salvo en caso de necesidad de abastecimiento a la población) **a los flujos del sistema de explotación** de los “caudales ambientales fijados”. Además se especifica su importancia como un **instrumento para alcanzar el buen estado o el buen potencial ecológico**, enlazando así con objetivos de la Directiva Marco Europea del Agua (Directiva 2000/60/CEE), en la que los “caudales ecológicos” se constituyen una herramienta primordial para la **consecución de los objetivos ambientales** de conservación, prevención y mejora y restauración del estado de las masas de agua superficiales.

Muchos son los términos utilizados para hacer referencia a los “caudales ecológicos”: Llámense de una forma u otra, hoy es indiscutible que se **trata de una restricción preferente a todo uso** (salvo abastecimiento en casos de emergencia), **capaz de mantener la composición, estructura y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos y de los ecosistemas terrestres asociados, permitiendo que tengan lugar determinados procesos ecológicos clave, a partir de los cuales las especies interaccionan y las poblaciones y comunidades cambian, fluctúan y evolucionan, y contribuyendo así a alcanzar el buen estado o potencial ecológico en ríos o aguas de transición.**

Durante mucho tiempo (y por desgracia todavía hoy en determinados casos), se ha utilizado la expresión “caudal ecológico” refiriéndose con ésta, implícito, únicamente a un “caudal mínimo” que permite la preservación de las condiciones ambientales. Quedaba olvidado así que los regímenes naturales de caudales fluctúan durante el año, y entre años, y que en ocasiones estas **variaciones intranuales e interanuales** son los **principales factores condicionantes de las características geomorfológicas y biológicas de nuestros ríos.**

Por tanto, el término “ecológico” debe ser aplicado no a un valor único de caudal, sino a un conjunto de estos que siguen un patrón de variación similar al régimen natural. **Para enfatizar en el carácter fluctuante de los caudales ecológicos, se propone aquí el uso de la expresión “régimen ecológico de caudales” (REQ en adelante).**

El **régimen hidrológico posee un papel esencial** en la consecución de los objetivos de buen estado o potencial ecológico a través de su papel en la preservación o restauración de los componentes y procesos del ecosistema fluvial. Tanto de forma directa, como de forma indirecta mediante su efecto dinamizador de las características físicas que subyacen las comunidades biológicas, el régimen hidrológico condiciona la distribución de las especies, su capacidad adaptativa, su capacidad de supervivencia, de dispersión, de reproducción,... y en definitiva la biodiversidad, producción y sostenibilidad de los ecosistemas fluviales (Poff et al. 1997; Bunn & Arthington, 2002).

A continuación se resumen las principales funciones y condiciones ecológicas necesarias para lograr una dinámica adecuada en los ecosistemas acuáticos, y que son a su vez altamente dependientes de los regímenes hidrológicos:

- ❖ **Mantenimiento de la diversidad del hábitat y su conectividad.**
- ❖ **Mantenimiento de condiciones hidrodinámicas adecuadas.**
- ❖ **Garantía de la estacionalidad (tiempo/espacio) de las características del hábitat.**
- ❖ **Sincronización de patrones ambientales.**
- ❖ **Control de presencia, abundancia, dispersión y movilidad de especies.**
- ❖ **Buenas condiciones fisico-químicas de agua y sedimento.**
- ❖ **Mejora de condiciones y disponibilidad de hábitat por la dinámica geomorfológica.**
- ❖ **Control y mejora de procesos hidrológicos.**

Cabe destacar el papel determinante del régimen hidrológico en la evolución de estrategias adaptativas de las especies y su capacidad para entorpecer los procesos invasivos de especies exóticas.

## 2.- Antecedentes. Metodologías existentes

Las diferentes herramientas diseñadas para definir los REQ pueden agruparse en cuatro grupos: **hidrológicos**, **hidráulicos**, de **simulación del hábitat** y **holísticos**. Comenzaron a desarrollarse en EEUU en los años 70 con el objetivo inicial de estimar los caudales mínimos requeridos para una especie concreta generalmente de interés comercial o deportivo. Posteriormente los objetivos se fueron ampliando a otras especies, poblaciones o comunidades biológicas y, en la actualidad, se han desarrollado de tal forma que abarcan aspectos relacionados con la estructura y funcionamiento del ecosistema en su conjunto, e incluso las que incorporan como variable a considerar las poblaciones humanas ribereñas dependientes del río. Todas ellas se han desarrollado a diferentes niveles y escalas, desde un sistema de explotación o una cuenca, hasta un tramo de río concreto, y por supuesto, tanto para sistemas hídricos regulados como no regulados.

Los **métodos hidrológicos** se basan en registros foronómicos para establecer las recomendaciones de caudal, y se diferencian unos de otros en función de cómo tratan los datos hidrológicos (caudales clasificados, porcentajes, análisis de series temporales (mensuales o de series continuas de datos diarios), etc.). Son los más versátiles dado que son aplicables a distintas escalas desde la de la planificación hidrológica hasta la de tramos de ríos concretos; se realizan en gabinete y son rápidos, sencillos y poco costosos; pero requieren de datos de aforos disponibles y fiables.

Los **métodos hidráulicos** utilizan una sección transversal del cauce fluvial y emplean la relación entre los cambios que se producen en variables hidráulicas sencillas (normalmente el perímetro mojado o la profundidad) y el caudal. Sólo admiten aplicaciones locales y son relativamente rápidos en su cálculo.

Los **métodos de simulación del hábitat** establecen los requerimientos de caudales ecológicos sobre la base de las respuestas de las comunidades ante los cambios de caudal. Generalmente parten de la relación entre el **hábitat físico preferente** (hábitat potencial útil) de una especie de referencia y el **caudal** mediante simulación hidráulica. Son métodos que sólo admiten aplicaciones a secciones y tramos concretos de ríos y

requieren de la definición de **“curvas de preferencia”** de hábitats para cada especie objetivo en cada estado de su ciclo vital. Además, cambios en la topografía del terreno y granulometría del sustrato originan modificaciones del hábitat que pueden ser vitales para las comunidades por lo que requieren de revisión.

Los **métodos holísticos** proponen unos caudales que satisfagan todos los componentes del ecosistema conformado por el río, desde abióticos y bióticos, hasta paisajísticos y socioeconómicos. Son el mejor método en la teoría, sin embargo en la práctica su aplicación se torna muy compleja por el número de factores que intervienen.

Estas metodologías surgen en territorios y paisajes concretos y, en la mayoría de los casos solamente son de aplicación en los ecosistemas acuáticos para las que han sido desarrolladas. Por esta razón, no son trasladables sin más a nuestro territorio, máxime si tenemos en cuenta que los ríos en nuestro país son muy singulares, y por tanto se requiere su adaptación. En la actualidad se han desarrollado en España diversas metodologías, a destacar la hidrológica “método del Caudal Básico de Mantenimiento” (QBM) (Palau, 1994; Palau & Alcazar, 1996; Palau et al., 1998; Sánchez, 2000), y de simulación del hábitat “metodología Instream Flow Incremental Methodolgy (IFIM) (Bovee, 1982) adaptada a nuestros ríos (García de Jalón, 1990; Cubillo et al., 1990) y el método Vasco (Docampo Pérez y García de Vicuña, 1993).

### **3.- Aspectos del régimen hidrológico de importancia ecológica**

Se ha visto que el régimen hidrológico puede llegar a tener un papel preponderante sobre la composición, estructura, funcionamiento y dinamismo de los ecosistemas fluviales, pero cabe preguntarse **qué aspectos concretos del régimen hidrológico son los más determinantes** y por tanto no deben olvidarse a la hora de definir un “régimen ecológico de caudales” (REQ) para una masa de agua superficial concreta.

#### **3.1.- Caudal Mínimo**

Es imprescindible evaluar la flexibilidad del ecosistema o de sus comunidades. En efecto, las comunidades fluviales han evolucionado adaptadas a las fluctuaciones de



caudales, respondiendo con cambios estructurales y funcionales a las disminuciones de caudal circulante. Esta respuesta, dentro de un rango de extracciones de caudal, es de carácter elástico. Si las extracciones hacen que el caudal circulante disminuya por debajo de un determinado umbral, la respuesta de la comunidad fluvial dejará de ser elástica para convertirse en plástica, es decir que los cambios originados en ella dejan de ser reversibles, y la comunidad no se recupera de las perturbaciones. La cuantificación de los caudales mínimos ecológicos representa la **estimación de las condiciones límites de tolerancia a la escasez de caudal**, o lo que es lo mismo, los **umbrales de la resiliencia de la comunidad**.

Se trata de un valor de **caudal bajo al que las poblaciones fluviales han estado sometidas durante un período largo de días sin sufrir alteración**. Tiene un gran significado biológico, ya que no es un caudal puntual que ocasionalmente puede darse un día y que puede ser soportado con mayor o menor facilidad por las comunidades, sino que se trata de un caudal que ha estado mantenido durante un tiempo prolongado y que ha condicionado una resistencia de los individuos frente a él. Este parámetro describe las situaciones que con más frecuencia sufre la biocenosis del río, y que por lo tanto es a las que están adaptadas.

### **3.2.- Régimen de Caudales**

Como se ha mencionado ya en un capítulo anterior, las exigencias de hábitat y de caudales circulantes por parte de los peces y de las comunidades reófilas no son las mismas a lo largo de las diferentes estaciones, sino que existen temporadas críticas en las cuales estas exigencias se hacen más perentorias. Así los períodos de freza y de desarrollo de los embriones exigen unos caudales determinados sin crecidas, y en las épocas estivales con aguas cálidas, los salmónidos exigen aguas más rápidas para poder tolerar la escasez de oxígeno disuelto. Por ello los caudales ecológicos circulantes han de ser mayores en estas épocas críticas y por lo tanto estos caudales, si deseamos que sean mínimos, han de fluctuar de unas estaciones del año a otras.

Se necesita **definir las pautas de fluctuación que conservan al hábitat fluvial en todos los estados de desarrollo de las especies acuáticas**. Las especies han evolucionado de acuerdo con estas pautas, por lo que parece lógico imitar a la

**fluctuación estacional** que se da en el régimen natural a la hora de establecer el régimen de caudales ecológicos. Debemos modular dicho régimen de acuerdo con las fluctuaciones naturales haciéndolas compatibles con los mínimos determinados por los criterios de exigencia de hábitat comentados anteriormente.

Pero 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 también debe recogerse en la propuesta de REQ, 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). Se considerarán diferentes regímenes de caudales según se trate de “**años secos**” o de “**años normales**”.

### **3.3.- Caudal Máximo de Estiaje**

Un estudio detallado de los regímenes de caudales naturales (restituidos mediante modelos) de los ríos de la Cuenca del Ebro (Bejarano, 2007), muestra un descenso importante de los niveles de caudal circulante todos los años durante la estación seca. Además, determinados ríos, denominados “**temporales**” (Munné y Prat, 1997 y Munné y Bonada, 2006), que discurren en su totalidad por el centro de la Depresión donde la precipitación media anual es inferior a los 400mm, ríos de cuencas pequeñas calizas permeables de la margen derecha en el centro y SE del Sistema Ibérico, y algunos ríos procedentes de la Cordillera Costero-Catalana, llegan incluso a permanecer una media superior a 30 días al año secos coincidiendo con los meses de verano.

Tanto el **descenso de los caudales** como los **estiajes** estacionales son una característica importante que influye sobre la estructura y funcionamiento de los ríos. Las comunidades acuáticas están acostumbradas a los períodos de caudal bajo. Especialmente en ríos temporales, los estiajes **son el motor evolutivo de su biodiversidad y conviene tener presente este hecho a la hora de gestionar estos ecosistemas. Los caudales ecológicos de ríos temporales deben ser diseñados “a medida” y la regulación artificial de sus aguas debe tener en cuenta la temporalidad de las mismas.**

En consecuencia, se propone la definición del parámetro “caudal máximo de estiaje”. Dicho parámetro hidrológico, calculado tanto para ríos permanentes como temporales, será el **umbral máximo de caudal que bajo ningún concepto, de forma artificial, será superado durante los meses de julio, agosto y septiembre** garantizando así las condiciones hídricas a las que fauna y flora del ecosistema fluvial están adaptados. El riego de los cultivos durante el verano con la consiguiente circulación de grandes cantidades de agua por los cauces, deberá tener siempre presente esta restricción.

En la gestión de los ríos definidos como temporales además, se impondrá un régimen de caudal nulo durante 30 días repartidos entre los meses de julio, agosto y septiembre, con un mínimo de 5 días por mes.

### **3.4.- Avenidas de Mantenimiento del Cauce**

Los ríos en ocasiones pueden sufrir con un cierto grado de impredecibilidad **crecidas** como respuesta a precipitaciones intensas en el espacio y/o en el tiempo (Suárez et al., 1995). **Las crecidas** se consideran también parte importante en el comportamiento de los ríos ya que **mueven agua y sedimentos y reorganizan la estructura de los cauces**, mantienen las condiciones fisico-químicas del agua y del sedimento, controlan la presencia de las diferentes especies, mejoran las condiciones de **disponibilidad del hábitat a través de la dinámica geomorfológica** y favorecen los procesos hidrológicos que controlan la conexión de las aguas de transición con el río, el mar y los acuíferos asociados. En ríos temporales ponen en contacto los tramos aislados, suponiendo en términos ecológicos una vía de comunicación y homogeneización. El cauce, y por lo tanto el hábitat que representa, se encuentra en equilibrio geomorfológico con los caudales que circulan por él. La disminución de caudales circulantes puede ocasionar un proceso de sedimentación que reduciría el tamaño del cauce y una pérdida de calidad del hábitat. Las avenidas ordinarias coinciden aproximadamente con los denominados “caudales generadores del cauce” (bankfull discharge”) que son los que de manera natural conforman el cauce.

Por ello, un REQ 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 drena cuencas áridas su frecuencia e intensidad debe ser mayor.

### 3.5.- Caudal de Acondicionamiento

Se fija como una opción para modificar el caudal mínimo, en el supuesto de que éste, por razones concretas, se mostrara inadecuado, como por ejemplo en aquellos cauces en los que el valor de conservación o el objetivo del caudal de mantenimiento es una componente o aspecto particular (un paisaje, un valor cultural, el control de una cuña salina, etc.), casos todos ellos más **estrictos**, en los que el “caudal mínimo”, podría no ser suficiente.

Además, en el cálculo de estos cinco parámetros hidrológicos comentados, es importante tener en cuenta la **magnitud**, la **frecuencia**, la **duración**, la **época** y la **tasa de cambio**, características del régimen de caudales críticas para los procesos ecológicos de los ecosistemas fluviales (Poff et al. 1997). Se definirá la **magnitud** del caudal **para todos los parámetros hidrológicos** comentados. Además se definirán la **frecuencia**, **duración y época** para las “**avenidas de mantenimiento del cauce**”. Y finalmente se fijará un intervalo en el que se muevan las **tasas de cambio**, tanto de ascenso como de descenso del caudal, aplicables principalmente para los **caudales generadores** y para los cambios de “**caudal mínimo**” de un mes a otro.

La **magnitud** de un caudal en un intervalo de tiempo dado es la cantidad de agua que se mueve a través de un lugar por unidad de tiempo. La **frecuencia** del caudal se refiere a cuántas veces tiene lugar un caudal por encima de una magnitud dada en un intervalo de tiempo específico, y está relacionada inversamente con la magnitud. La regulación hidrológica suele llevar asociada una reducción en la magnitud de los caudales, como la que sucede aguas abajo de los embalses de regadío y abastecimiento. Además tiene lugar una estabilización de los caudales, lo que da lugar a entornos constantes que carecen de extremos naturales, ya que disminuyen las crecidas en magnitud y frecuencia.

Ciertos organismos acuáticos (del perifiton, vegetación macrofítica sumergida, algunos macroinvertebrados y salmónidos) ven favorecido su desarrollo en condiciones de estabilización hidrológica, aunque generalmente a costa de las especies nativas (Ward & Stanford, 1979). Por su parte, en las riberas resulta en un aumento de especies riparias no propias que en condiciones normales serían arrastradas por la corriente (Ligon et al., 1995) y en una disminución de la supervivencia y reclutamiento de las plantas propias que conduce hacia estados más envejecidos y menos productivos del bosque ribereño (Nilsson & Berggren, 2000). Las consecuencias geomorfológicas de la reducción y estabilización de caudales son el aumento de la sedimentación (Petts, 1984; Kondolf, 1997) que estrecha el cauce y, en caso de deposición de sedimentos finos sobre gravas, dificultando la freza, y los cambios en la forma en planta del cauce y formación reducida de barras, meandros abandonados y canales secundarios.

La **estacionalidad** de un caudal de una magnitud dada se refiere a la regularidad con la que este ocurre. Los ciclos de vida de muchas especies están programados para evitar o bien aprovechar los caudales de magnitudes variables (Poff et al. 1997). Aguas abajo de embalses de regadío los caudales en verano suelen ser más altos de lo normal, mientras que en invierno lo son más bajos.

La pérdida de caudales punta estacionales tiene consecuencias negativas para el ecosistema: destrucción de puestas y larvas; interrupción del desove, la incubación o la migración; invasión de especies exóticas requerimientos menos exigentes; reducción de tasas de crecimiento; dificultad de colonización por parte de las especies vegetales e impedimento de la dispersión de semillas y germinación.

La **duración** es el período de tiempo asociado a una condición de caudal específica. Inundaciones prolongadas destruyen hábitats y caudales bajos prolongados producen un estrés fisiológico importante en la vegetación de ribera que puede terminar en una reducción de la cubierta vegetal e incluso mortalidad.

La **tasa de cambio** se refiere a la rapidez con que cambia un caudal de una magnitud a otra. No existen organismos adaptados a los cambios rápidos en el nivel del río inducidos de forma artificial por las presas hidroeléctricas (que producen caudales circulantes elevados durante el día y bajos durante la noche). Tras el varado y lavado de

especies autóctonas, la comunidad macrobéntica se empobrece y queda reducida a especies tolerantes, disminuyendo así los recursos alimentarios de las comunidades piscícolas (García de Jalón, 1992). El retroceso acelerado de las avenidas dificulta el establecimiento de las semillas, ya que la supervivencia de las plántulas viene determinada por la tasa de recesión de las avenidas y del nivel freático de la llanura de inundación (Rood *et al.*, 1995).

#### **4.- Propuesta metodológica para el cálculo del “régimen ecológico de caudales” en ríos de la Cuenca del Ebro**

La Demarcación Hidrográfica del Ebro es la de mayor superficie de España. Comprende 85.378 km<sup>2</sup> aproximadamente, de los que tan solo 954 km<sup>2</sup> pertenecen a Francia y Andorra como pequeñas partes de las cuencas del Iratí y el Segre. Está drenada por el río Ebro que discurre en sentido NO-SE, desde las montañas Cantábricas hasta el Mediterráneo, donde desemboca formando un magnífico delta tras recorrer 910 km. Posee alrededor de 12.000 km de ríos principales dispuestos en forma de "espinas de pez", aunque se encuentran variadas tipologías en los diferentes sectores de la misma. Los recursos hídricos en régimen natural se estiman en 17.967 hm<sup>3</sup>/año. Engloba a 9 comunidades autónomas, 18 provincias y 1.717 términos municipales en España, espacio en el que residen 2.955.238 habitantes (datos de I.N.E. de 1 de enero de 2004), de los que un 60% se dedican al sector servicios, y el 40% restante en partes iguales al sector industrial, agricultura y construcción. En consecuencia, es una de las cuencas sometida a mayor explotación de sus recursos hídricos, resaltando la demanda **agraria** (6.310 hm<sup>3</sup>/año), la **refrigeración de centrales eléctricas** (3.340 hm<sup>3</sup>/año), el **abastecimiento urbano** (313 hm<sup>3</sup>/año), **usos industriales y trasvases** (250 hm<sup>3</sup>/año), **acuicultura y usos recreativos**.

Las enormes dimensiones de la cuenca hacen que la caracterización de los “regímenes ecológicos de caudales” (REQ) en cada tramo de cada río, sea una tarea complicada que requiere de tiempo y una gran inversión económica. Debido a la escasez de ambos, se propone, en primer lugar una metodología que prioriza la **rapidez y generalidad** y que es susceptible de ser aplicada de igual manera a cualquier punto de la cuenca sin atender a los detalles. A continuación, se propone una segunda metodología que por el contrario

prioriza la **particularidad y adaptabilidad a cada tramo fluvial** y que complementa a la anterior permitiendo descender a las características distintivas de cada tramo para adecuar el resultado de la fauna y flora de cada lugar.

De acuerdo con estos objetivos, entre la variedad de metodologías existentes comentadas con anterioridad, se han considerado adecuadas:

**1- Metodología a escala de cuenca: método hidrológico**

**2.- Metodología a escala de tramo: método de simulación del hábitat**

El **método hidrológico** se basa en una clasificación de los segmentos fluviales de la Cuenca del Ebro en función de las características principales de su régimen de caudal (variabilidad intranual y magnitud media y de máximos y mínimos) en grupos homogéneos (Bejarano, 2007). Se propone calcular los parámetros hidrológicos de importancia ecológica para un pequeño número de “ríos piloto” de cada tipología de caudal y estandarizarlos mediante cociente con su respectivo caudal medio anual natural. El promedio de estos valores estandarizados constituirá un “**régimen ecológico de caudales estandarizado**” (REQE) característico del grupo y que podrá utilizarse para el cálculo del “**régimen ecológico de caudales**” (REQ) de aquellos integrantes del grupo de los que se carezca de datos.

Para la caracterización y clasificación de los regímenes hidrológicos naturales de los ríos de la cuenca, se requiere de series de **caudales medios mensuales restituidos** a naturales mediante modelos en un gran número de estaciones de aforo distribuidas por la red fluvial. Para la determinación de los parámetros hidrológicos de determinados segmentos fluviales, es necesario acudir a las series de **caudales medios diarios** tomados únicamente en estaciones de aforo consideradas como “no afectadas por regulación”. Finalmente, para la generalización de los parámetros hidrológicos calculados para los “ríos piloto” al resto de ríos con la misma tipología de caudal, se precisa del **caudal medio anual natural** de una serie suficientemente larga para cada uno de ellos.

El **método de simulación del hábitat**, solventa los problemas de pérdida de precisión del método anterior, aunque su costo económico y el tiempo que lleva su aplicación son

bastante superiores. Por ello, se muestra en este informe como una metodología independiente a la anterior pero cuyos resultados pueden complementarla. Con ella se pretende conocer a fondo los requerimientos de caudal circulante de algunas especies o de determinadas comunidades reófilas, y de su distribución en el tiempo, en cada tramo fluvial en particular, para poder evaluar las necesidades de caudal con objeto de mantener sus poblaciones. Mediante modelos de simulación del hábitat, se propone el estudio del **“hábitat potencial útil”** de una **“especie indicadora”** para distintos caudales circulantes para finalmente definir un **“caudal mínimo”** necesario para la conservación de las comunidades acuáticas presentes en el tramo.

Precisa principalmente de la **topografía y de curvas de preferencia** de las especies objetivo a determinadas características hidráulicas (velocidad y profundidad) y morfológicas (tamaño del grano del lecho fluvial).

En el último borrador de la Instrucción de Planificación Hidrológica, se afirma que “los REQ definitivos serán resultado de un ajuste de los caudales obtenidos por un método hidrológico al resultado de la modelación de la idoneidad del hábitat”. Queda recogida aquí la importancia de la utilización de métodos precisos ya que “cada río es un mundo”.

#### **4.1.- Escala de cuenca: método hidrológico.**

##### **4.1.1.- Cálculo del “régimen ecológico de caudales” en tramos fluviales con una serie de datos de caudales diarios naturales suficientemente larga**

Se propone una metodología basada en el estudio estadístico de las series diarias de caudales naturales reales medidos en estaciones de aforo fuera de todo síntoma de regulación, para el cálculo de determinados índices de alteración hidrológica definidos por Ritcher (Ritcher et al, 1996, 1997) y de cuyos percentiles derivarán los valores de los parámetros hidrológicos de mayor importancia ecológica y que caracterizarán el régimen ecológico de caudales. **Metodología de los percentiles.**

La definición de “caudal mínimo”, “régimen de caudales”, “caudal de acondicionamiento”, “caudal máximo de estiaje” y “caudal generador”, se ha basado en



los Índices de Alteración Hidrológica de Ritcher (Ritcher et al, 1996, 1997). La obtención de estos índices es rápida y relativamente sencilla, gracias al programa IHA (Indicator of Hydrological Alteration), que calcula a partir de datos de caudal a escala diaria, 33 parámetros organizados en cinco grupos, para caracterizar estadísticamente la variación hidrológica de cada año. Estos **parámetros proporcionan información de rasgos ecológicamente significativos de los regímenes de aguas superficiales y subterráneas que influyen en ecosistemas acuáticos, inundables y riparios**. Están basados en las cinco características fundamentales de los regímenes hidrológicos: magnitud, frecuencia, duración, estacionalidad y tasas de cambio.

Como medidas de posición y de dispersión del conjunto de resultados para cada uno de los parámetros de Ritcher, se ha trabajado con **descriptivos no paramétricos** tales como medianas y percentiles respectivamente, por considerarlos más acordes a la realidad al no estar influenciados por los extremos. Con respecto a la utilización de medias y desviaciones típicas, los descriptivos no paramétricos suelen subestimar ligeramente los resultados. Por otro lado, generan el problema de la aparición en ocasiones (por lo general cuando se trata de ríos temporales durante períodos de sequías) de valores nulos que no pueden ser utilizados a la hora del cálculo de ningún parámetro hidrológico. En estos casos se propone el uso de los descriptivos paramétricos.

#### 4.1.1.1.- Cálculo del Caudal Mínimo

Se propone utilizar el parámetro de Ritcher “**caudal mínimo de 90 días**” ( $Q_{min90d}$ ), que representa la media móvil más pequeña del caudal que ha circulado por el río durante 90 días consecutivos. El período de duración de una estación es aproximadamente 90 días, por lo que con este parámetro generalmente se estarán teniendo en cuenta los mínimos de períodos prolongados secos como los meses de verano no quedando los resultados influenciados por valores puntuales extremadamente secos. De los valores que toma dicho parámetro para la serie de años con la que se trabaja, se propone seleccionar aquel que es sólo rebajado en un 10% de los años, (o lo que es lo mismo, superado en el 90% de las ocasiones), es decir, el **percentil 10**.

Para los años secos, se propone la utilización del parámetro **“caudal mínimo de 30 días”** ( $Q_{min30d}$ ), como la media móvil más pequeña del caudal que ha circulado durante 30 días consecutivos. Su elección está basada en los estudios de Baeza y Jalón en la Cuenca del Tajo (Baeza y Jalón, 2005), que detectan un cambio de pendiente alrededor del día 25 en las gráficas que representan el comportamiento de un río en momentos de estiaje (mínimo caudal medio de días consecutivos frente a los días acumulados para los que ha sido calculado). De igual modo que para años normales, los valores que toma dicho parámetro para la serie de años con la que se trabaja, se seleccionará aquel que es sólo rebajado en un 10% de las ocasiones, es decir, el **percentil 10**.

El caudal circulante en el cauce durante todo el año nunca podrá ser menor que el “caudal mínimo”, salvo que de forma natural el cauce se seque (ocurre en ríos temporales donde de forma natural en los meses de estiaje el caudal es cero más de un cierto número de días y de los que se hablará más adelante).

#### **4.1.1.2.- Cálculo del Régimen Caudales**

A partir del caudal mínimo establecido, estamos en condiciones de elaborar unos regímenes de caudales ecológicos utilizando la curva de caudales medianos mensuales (en régimen natural), ajustando el valor mensual mínimo de esta curva al valor de “caudal mínimo” definido en el apartado anterior y calculando los caudales de los restantes meses de forma proporcional. El “régimen de caudales ecológicos” debe **fluctuar a lo largo del año** siguiendo una pauta similar a la del régimen natural, y para ello, disminuirémos los valores **mensuales medianos** de este en una proporción igual a la relación entre el “caudal mínimo” ecológico calculado y el caudal mediano mensual natural mínimo.

Se propone calcular un **factor de proporcionalidad** como cociente entre el valor del “caudal mínimo” y la mediana del mes más seco del año y multiplicar los valores medianos naturales de cada mes por dicho factor obteniendo así un “régimen ecológico de caudales”.

Para tener en cuenta también la **variabilidad interanual** de los regímenes naturales de caudales, será necesario calcular un factor de proporcionalidad, no solo para los años normales, sino también para los años secos. Se propone el uso del “caudal mínimo” de años normales y el “caudal mínimo” de años secos para el cálculo de este factor en función del año.

En ríos regulados mediante embalses, definimos “**años secos**” y “**años normales**” en función de las existencias de agua en los embalses de la cuenca o subcuenca correspondientes al comienzo del año hidrológico. Se propone considerar como “normales” a los años en los que los embalses se encuentran por encima de la mitad de su capacidad, y como “secos”, a los años en los que los están por debajo de la mitad de su capacidad.

En 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.

#### **4.1.1.3.- Cálculo del Caudal Máximo de Estiaje**

Se propone definir un “caudal máximo de estiaje” para cada mes del verano, y corresponderá con aquel valor del caudal registrado en julio, agosto y septiembre, que haya sido superado sólo en un 25% de los años con los que se está trabajado; es decir, el **percentil 75** de los parámetros de Ritcher “**caudal de julio**”, “**caudal de agosto**” y “**caudal de septiembre**” (Qjul, Qag, Qsep). Será un límite al caudal máximo durante los meses de julio, agosto y septiembre para evitar que por el cauce circulen de **forma artificial** caudales superiores a los que normalmente lo hacen. Está expresamente pensado para evitar el problema que ocasionan las presas de regadío. No será necesario restringir el caudal máximo en los casos en los que estos sean superados por causas naturales.

Pese a que se propone como un parámetro para todos los ríos de la cuenca, este es especialmente importante en ríos temporales (como ya se he explicado en el apartado anterior), donde además se impondrá un **caudal nulo durante 30 días** repartidos entre

los meses de julio, agosto y septiembre, con un mínimo de 5 días al mes. Por su parte, muchos de los regímenes típicos pirenaicos poseen caudales muy bajos (y en ocasiones inferiores a los de verano) entorno a los meses de enero y febrero coincidiendo con la acumulación de nieve en cabeceras. Sin embargo, no se considera importante fijar caudales máximos para ellos en esta época puesto que suele ser en verano cuando se mueven mayores caudales con objetivos de puesta en riego de cultivos.

#### **4.1.1.4.- Cálculo del Caudal Generador**

##### **Magnitud y Frecuencia.**

El cálculo de la magnitud del “caudal generador” se basa en el análisis estadístico de la serie de caudales “**máximo de un día**” (1daymax) de Ritche, formada por el valor del máximo anual para cada uno de los años seleccionados no regulados, mediante su ajuste a una función de distribución Gumbel, con objeto de obtener los caudales correspondientes a ciertos períodos de retorno.

Se propone la selección del caudal correspondiente al **período de retorno de 2 años** en todos los ríos, salvo en aquellos de hidrogramas muy variables con coeficientes de variación altos, donde se recomienda el uso del caudal correspondiente al **período de retorno de 5 años**.

##### **Momento de ocurrencia.**

Se propone el uso del parámetro de Richter “**fecha del máximo**” (date of maximum), que indica el día del año juliano en el que se ha producido la máxima anual. Se escoge como momento para generar la avenida, cualquier ocasión a lo largo de un mes, desde 15 días antes y hasta 15 días después del día fijado por el valor correspondiente al **percentil 75** de dicho parámetro.

Sólo se definirán caudales generadores durante los años normales (nunca en años secos).

##### **Duración.**

Se propone el uso del **percentil 10** del parámetro de Richter “duración de pulsos altos” (high pulse duration), que representa la duración en días, de los pulsos altos.

### **Tasas de cambio.**

En este caso se propone un intervalo dentro del cual deberán moverse las tasas de cambio tanto de ascenso como de descenso en unidades de ascenso/descenso de caudal diario ( $\text{m}^3/\text{s} / \text{día}$ ). Se utiliza para ello el **intervalo percentil 25-percentil 75** de los parámetros de Ritcher **“tasa de ascenso”** (Rise Rate) y **“tasa de descenso”** (Fall Rate) que incluirá los valores más frecuentes de estos parámetros a lo largo de los años considerados.

#### **4.1.1.5.- Cálculo del caudal de acondicionamiento**

Para **casos especiales en los que se requiera la protección de un segmento fluvial concreto**, se propone un “caudal mínimo” un **10% superior** al definido para cualquier otro segmento mediante los criterios explicados en el apartado 5.1.1.1, aumentando así las reservas ecológicas.

#### **4.1.2.- Cálculo del “régimen ecológico de caudales” para toda la Cuenca del Ebro, basado en la caracterización regional de sus regímenes de caudales**

Para el cálculo de los parámetros hidrológicos mencionados se precisa de series superiores a 20 años de **datos reales a escala temporal diaria y procedentes de tramos hidrológicamente no alterados**, sin embargo el número de estaciones de aforo que cumplen estos requisitos es bastante limitada y se torna imposible llegar a definir el “régimen ecológico de caudales” (REQ) para el resto de tramos de los que se carece de esta información.

Para solventar este problema, acudimos a una clasificación a grandes rasgos de los distintos regímenes hidrológicos presentes en la Cuenca del Ebro (Bejarano, 2007), basada en series largas de caudales medios mensuales restituidos a régimen natural mediante modelos. En ella, se aprecian grupos compuestos por tramos fluviales cuyos caudales fluctúan a lo largo del año de igual forma, y cuya magnitud media, mínima y máxima se mueve dentro de un rango similar.

Se distinguen 10 tipos de régimen de caudal (Figuras 1 y 2). Los tipos QA y QB se caracterizan por la presencia de dos picos máximos anuales (invierno y primavera), un estiaje marcado en verano y escasa fluctuación intranual. El tipo QB es de los más caudalosos de la cuenca con  $107 \text{ m}^3/\text{seg}$  de caudal medio anual promedio del grupo, mientras que el del grupo QA es de  $16 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Las cabeceras de la cornisa Vasco-Cantábrica pertenecen al tipo QA y representan el 13% del total de segmentos. Sus tramos bajos y los de las sierras riojanas, así como los segmentos de cuencas vertientes de gran tamaño del Ebro exceptuando su desembocadura, pertenecen al tipo QB y representan el 18% del total de segmentos.

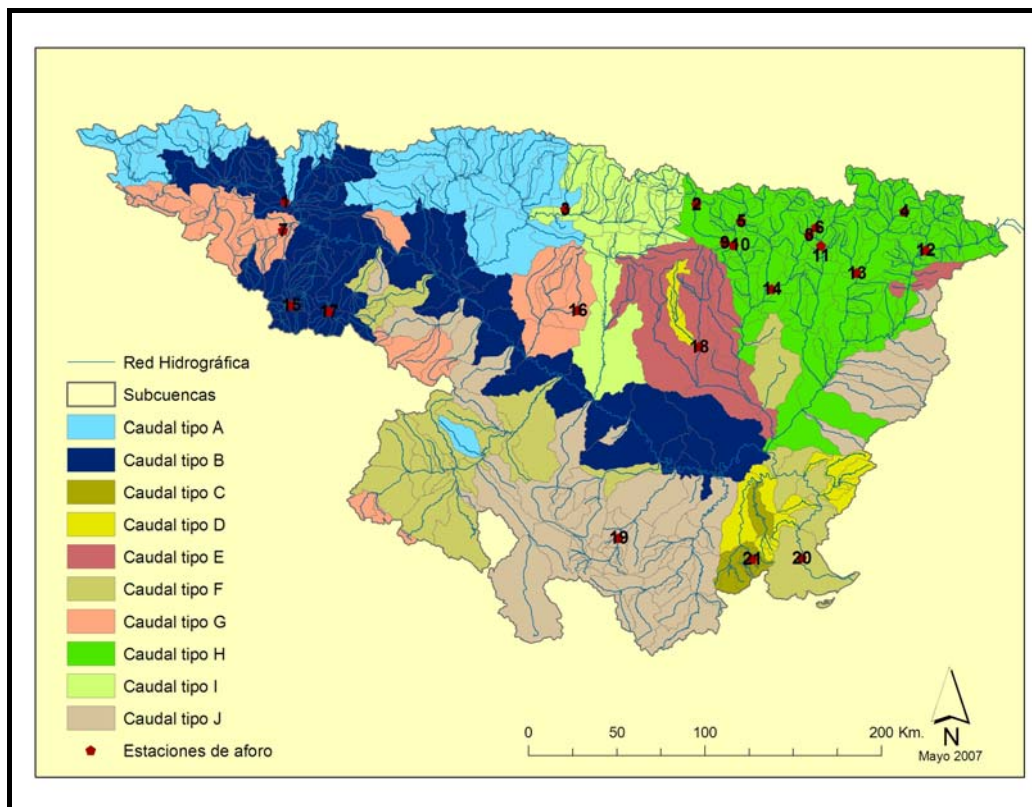
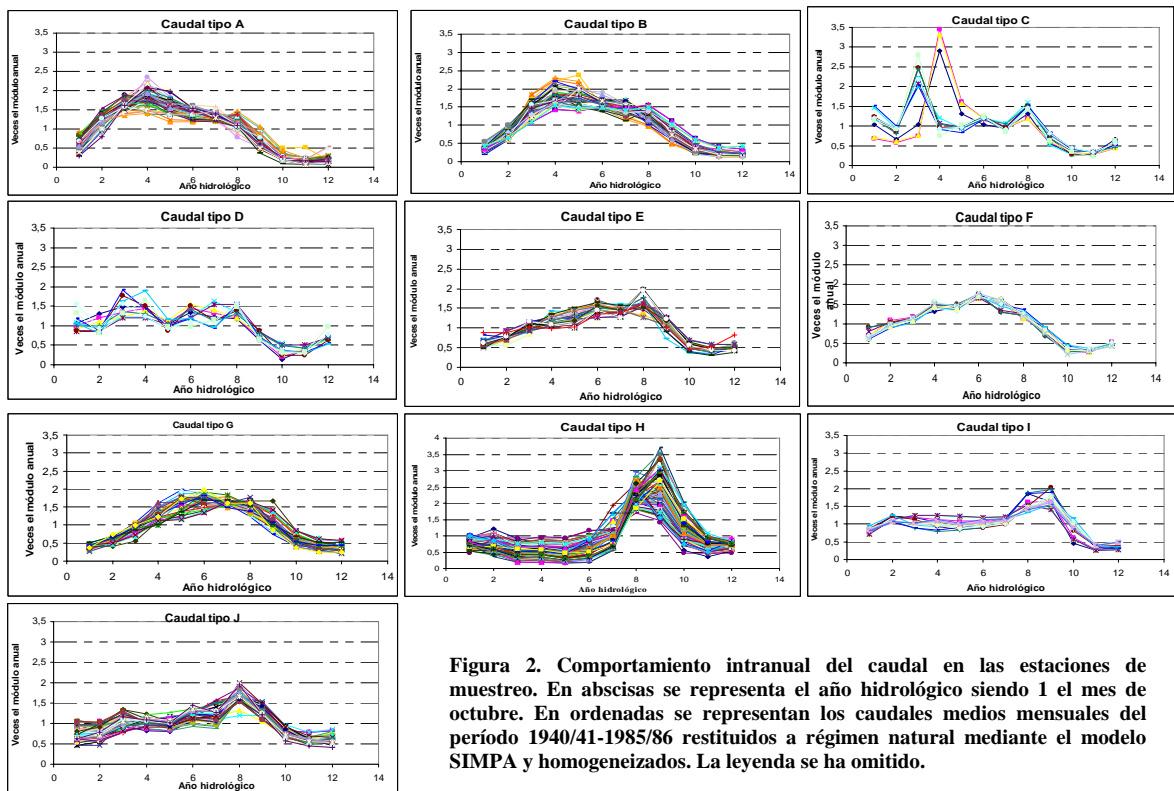


Figura 1. Demarcación Hidrográfica del Ebro. Tipologías de regímenes de caudal y estaciones de aforo seleccionadas para el estudio de los REQ: 1) Ebro en Miranda de Ebro; 2) Ara en Torla; 3) Esca en Sigüés; 4) Vallfarrera en Alíns; 5) Cinca en Lafortunada; 6) N.Ribagorzana en Ginaste; 7) Tirón en Cuzcurruta; 8) Baliera en Noales; 9) Ara en Boltaña; 10) Cinca en Escalona; 11) N.Ribagorzana en Pont de Suert; 12) Segre en Seo Durgel; 13) N.Pallaresa en Pobla de Segura; 14) Isabena en Capella; 15) Najerilla en Mansilla; 16) Arba de Biel en Erla; 17) Iregua en Villoslada de Cameros; 18) Alcanadre en Peralta de Alcofea; 19) Martín en Alcaine; 20) Ebro en Tortosa; 21) Matarraña en Beceite.

Lo que distingue a los tipos QC y QD es su **elevada fluctuación intranual** con caudales muy bajos en julio y agosto. Son los grupos menos caudalosos de la cuenca con  $0,7 \text{ m}^3/\text{seg}$  y  $2 \text{ m}^3/\text{seg}$  de caudal medio anual promedio del grupo respectivamente, muchos de ellos temporales mediterráneos. Son solo el 3% de los segmentos.

Los tipos QE, QF, QG y QJ representan alrededor del 6% de los segmentos cada uno. Se caracterizan por la presencia de un máximo anual en primavera, más adelantado en QG y QF, y una estación de caudales mínimos coincidente con los meses de verano en todos salvo en el tipo QG que se prolonga hasta principios de noviembre. El tipo QF es de los más caudalosos de la cuenca con  $106 \text{ m}^3/\text{seg}$  de caudal medio anual promedio del grupo, y se presenta en los ríos Jalón, Cidacos y últimos tramos del Ebro. QE posee un caudal de  $13 \text{ m}^3/\text{seg}$  y se restringe a los tramos bajos del Cinca y sus afluentes. Son muy bajos los caudales de QG y QJ situándose alrededor de los  $2,5 \text{ m}^3/\text{seg}$ , coincidiendo muchos de ellos con segmentos temporales. Los primeros están muy repartidos por la cuenca, mientras que los segundos son típicos del SE del Sistema Ibérico y Cordillera Costero Catalana.

Finalmente, los tipos QH y QI presentan un pico muy por encima de la media anual en primavera tardía y un período de caudales mínimos muy largo en el primero y más acentuado y restringido a la estación estival en el segundo. Su caudal medio anual promedio es de  $30 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Son típicos de la Cordillera Pirenaica, representando al 35% de los segmentos en el caso del tipo QH y al 9% el QI.



Asumimos que los parámetros hidrológicos calculados para un conjunto de tramos de los que se dispone de datos dentro de un mismo grupo, serán asimilables al resto de miembros del grupo. Se propone homogeneizar los REQ (todos los parámetros hidrológicos que lo caracterizan) calculados para cada tramo con datos naturales diarios, mediante el cociente de cada uno de los parámetros con su caudal medio anual natural, obteniendo los **parámetros hidrológicos homogeneizados promedio para cada grupo y que constituirán el “régimen ecológico de caudales estandarizado” (REQE** en adelante) del grupo en cuestión. Los REQ de tramos sin datos naturales suficientes a escala diaria, se derivarán de los REQE (promedio de parámetros homogeneizados) para la tipología de caudal al que pertenecen mediante la multiplicación por su caudal natural promedio de una serie de años suficientemente larga (serie de caudales reales de un período no regulado o bien serie de caudales restituidos a naturales mediante modelos).

Por su parte, la identificación de estaciones de aforo sobre “tramos fluviales no alterados” se ha hecho en base a la proporción de aportación embalsada aguas arriba con respecto a la aportación total, considerando “tramos no alterados” aquellos con menos del 10% del total regulado.

#### **4.2.- Escala de tramo: método de simulación del hábitat.**

Se propone la metodología **IFIM (Instream Flow Incremental Methodolgy)**, (Bovee, 1982; y sus adaptaciones en España: García de Jalón, 1990; Cubillo et al., 1990). Esta nos permitirá conocer las respuestas de las comunidades existentes en cada tramo fluvial ante alteraciones en su hábitat físico consecuencia de modificaciones en el régimen de caudales.

La base conceptual de esta metodología reside en el establecimiento de los requerimientos de hábitat fluvial de determinadas especies o comunidades reófilas peculiares, y su distribución a lo largo de sus distintos estados del ciclo vital, para evaluar las necesidades de caudal para la supervivencia de sus poblaciones.

Las demandas de hábitat de las comunidades acuáticas se basan en la selección de una población de “**especie indicadora**” cuyos requerimientos de hábitat representen aquellos de la comunidad al completo. Suele hablarse de peces nativos en el tramo de



estudio, en la cúspide de la pirámide trófica (trucha, barbo,...) y de gran tamaño. Únicamente en “ríos temporales” o excesivamente torrenciales donde no existen peces, se usaran macroinvertebrados como especies indicadoras. Los componentes principales del hábitat físico que deben tenerse en cuenta son: la estructura del canal (**sustrato del lecho**) que es independiente de los valores de caudal; y las condiciones hidráulicas (**profundidad** y **velocidad**). Las preferencias de cada estado vital de una “especie indicadora” por la profundidad, velocidad y sustrato, se evalúa de forma experimental y se expresa en forma de **“curvas de preferencia”**.

La “ocurrencia” de una población acuática en un tramo fluvial está determinada por factores físicos y biológicos. Sin embargo, mientras que el caudal puede modificar de forma casi instantánea determinadas características físicas relevantes, la respuesta de la población suele sufrir cierto retraso debido al tiempo que requieren procesos biológicos como la reproducción, reclutamiento, crecimiento, mortalidad, etc. Por lo tanto, consideramos el **“hábitat potencial útil” (en adelante HPU) (“Weighted Usable Area”, Bovee, 1982) como un valor del hábitat potencial del tramo, independientemente de si este está ocupado o no.**

Para calcular el HPU, se propone la utilización del “Índice Combinado de Adecuación” (“Composite Suitability Index”) (Ecuación 1) a las preferencias para cada píxel mojado, como la media geométrica de las tres preferencias (preferencia a profundidad, preferencia a velocidad y preferencia a sustrato). El HPU vendrá dado para cada estado vital de la “especie indicadora” como un agregado del producto del CSI evaluado en cada píxel y el área del píxel.

$$CSI = \sqrt[3]{Sd \cdot Sv \cdot Ss}$$

Ecuación 1. Índice combinado de adecuación (“Composite Suitability Index”). S: preferencia; d: profundidad; v: velocidad; s: sustrato (rango 0-1).

Mediante una simulación hidráulica uni o bidimensional en el tramo de estudio (HEC-RAS, RIVER 2D, GUAD 2D, etc.) y los requerimientos de hábitat de la “especie indicadora” seleccionada expresados en forma de “curvas de preferencia”, se pueden establecer las relaciones entre los caudales circulantes y el HPU para dicha especie en el tramo. De este modo, se puede asignar un significado ecológico a los caudales. Así, el

“caudal mínimo”, es aquel por debajo del cual la “especie indicadora” no podría sobrevivir (y por ende el resto de comunidades del tramo) debido al descenso en picado del hábitat potencial, y por encima del cual, el hábitat aumenta progresivamente siendo cada vez menos limitante para la supervivencia de la especie.

Es difícil definir un único valor de “caudal mínimo”, debido a la existencia de un rango de caudales en transición en la curva de relación caudales-HPU, en los que el hábitat potencial puede considerarse en el límite de lo favorable para la “especie indicadora”. Se proponen un par de valores, coincidentes con los **extremos de este rango, como “caudal mínimo” de años secos el extremo inferior, y como “caudal mínimo” de años normales el extremo superior** (García de Jalón, 2003).

## 5.- Ejemplos

### 5.1.- Regímenes ecológicos a escala regional

Tabla 1a. Parámetros hidrológicos que constituyen el REQ de los tramos fluviales seleccionados: caudal mínimo en años secos ( $m^3/seg$ ) ( $Q_{min\_seco}$ ); caudal mínimo en años normales ( $m^3/seg$ ) ( $Q_{min\_normal}$ ); caudal máximo de estiaje en julio, agosto y septiembre ( $m^3/seg$ ) ( $Q_{max\_JL}$ ;  $Q_{max\_AG}$ ;  $Q_{max\_SP}$ ); magnitud ( $m^3/seg$ ) ( $Q_{gen\_mag}$ ), frecuencia (años) ( $Q_{gen\_frec}$ ), momento (mes) ( $Q_{gen\_mom}$ ) y duración (días) ( $Q_{gen\_dur}$ ) del caudal generador; e intervalo de tasas de cambio de ascenso (Inter.TCA) y descenso (Inter.TCD) ( $m^3/seg/día$ ).

Río	$Q_{min\_seco}$	$Q_{min\_normal}$	$Q_{max\_JL}$	$Q_{max\_AG}$	$Q_{max\_SP}$	$Q_{gen\_mag}$	$Q_{gen\_frec}$	$Q_{gen\_mom}$	$Q_{gen\_dur}$	Inter.TCA	Inter.TCD
Esca (Sigüés)	0,6	1,0	3,2	2,6	2,4	130,0	2	AB	2	(1,1/2,7)	(-1,0/-0,5)
Ebro (M.Ebro)	6,2	7,5	24,5	20,4	20,7	608,0	2	MZ	2	(7,2/25,7)	(-25,7/-8,6)
Najerilla (Mansilla)	0,1	0,1	1,6	1,4	1,1	38,7	2	FB	2	(0,4/1,0)	(-0,7/-0,3)
Iregua (V.Cameros)	0,1	0,1	1,1	0,6	0,6	44,5	2	NV	2	(0,2/0,6)	(-0,4/-0,2)
Matarraña (Beceite)	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	2,3	2	DC-EN	3	(0,03/0,16)	(-0,06/-0,02)
Alcanadre (P.Alcofea)	0,1	0,2	1,4	1,2	1,3	85,4	2	DC	2	(0,3/5,0)	(-0,7/-0,2)
Ebro (Tortosa)	45,0	73,2	293,2	194,8	219,9	2710,0	2	OC	2	(40,5/94,7)	(-48,0/-30,6)
Tirón (Cuzcurrita)	0,2	0,3	3,1	2,0	2,0	34,0	2	AG-SP	2	(0,2/0,4)	(-0,4/-0,2)
Arba de Biel (Erla)	0,0	0,0	0,4	0,5	0,3	133,0	5	EN	1	(0,1/0,2)	(-0,12/-0,055)
Segre (Seo Durgell)	1,3	2,4	12,8	7,7	7,4	82,2	2	OC	2	(0,7/1,6)	(-1,0/-0,6)
Ara (Torla)	1,0	1,7	12,4	4,4	4,2	64,1	2	NV	1,85	(0,5/0,8)	(-0,4/-0,2)
Ara (Boltaña)	1,6	2,7	12,4	6,5	7,0	178,3	2	NV	1	(1,7/3,3)	(-1,5/-0,8)
Isabena (Capella)	0,2	0,6	3,1	2,1	2,5	28,0	2	EN	1,5	(0,4/1,1)	(-0,6/-0,2)
Cinca (Lafortunada)	3,9	5,1	12,8	7,7	7,4	91,6	2	NV	2	(0,8/1,7)	(-1,4/-0,8)
Cinca (Escalona)	4,6	7,5	32,8	19,1	20,2	270,0	2	NV	1,75	(1,6/3,7)	(-3,4/-1,6)
N.Ribagorzna (Ginaste)	1,4	1,6	9,5	6,2	5,8	38,2	2	OC	2	(0,3/0,4)	(-0,3/-0,2)
N.Ribagorzna (P.Suert)	3,4	4,4	23,0	14,7	13,3	96,5	2	NV	1,2	(1,2/1,9)	(-1,8/-1,1)
N.Pallaresa (P.Segura)	6,9	8,2	40,5	21,7	20,1	195,0	2	SP	2	(2,0/3,1)	(-3,3/-2,1)
Baliera (Noales)	0,3	0,3	1,8	1,1	1,5	15,4	2	NV	2	(0,08/0,135)	(-0,11/-0,06)
Vallfarrera (Alins)	0,07	0,10	1,4	1,1	0,8	10,0	2	JL	2	(0,1/0,2)	(-0,14/-0,08)
Martín (Alcaine)	0,1	0,1	0,7	0,6	0,5	6,7	2	OC	1	(0,1/0,3)	(-0,2/-0,1)

Tabla 1b. Parámetros hidrológicos que constituyen el REQ de los tramos fluviales seleccionados: Régimen de caudales para años secos y años normales ( $m^3/seg$ ).

Río	REQ	OC	NV	DC	EN	FB	MZ	AB	MY	JN	JL	AG	SP
Esca (Sigüés)	seco	1,2	2,6	3,8	5,1	5,1	5,3	5,5	4,0	2,1	1,0	0,7	0,6
	normal	1,8	4,0	5,7	7,6	7,6	8,0	8,3	6,0	3,1	1,5	1,1	1,0
Ebro (M.Ebro)	seco	6,9	14,0	23,4	23,6	37,6	32,4	23,4	18,0	9,5	6,9	6,2	6,7
	normal	8,4	16,9	28,3	28,5	45,4	39,1	28,3	21,8	11,5	8,4	7,5	8,1
Najerilla (Mansilla)	seco	0,1	0,1	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1
	normal	0,1	0,2	0,6	0,8	0,9	0,9	0,9	0,7	0,3	0,2	0,1	0,1
Iregua (V.Cameros)	seco	0,1	0,2	0,4	0,4	0,6	0,8	1,1	0,7	0,4	0,1	0,1	0,1
	normal	0,2	0,4	0,6	0,6	0,9	1,2	1,8	1,1	0,7	0,2	0,1	0,1
Matarraña (Beceite)	seco	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	normal	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Alcanadre (P.Alcofea)	seco	0,2	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,4	0,1	0,1	0,1
	normal	0,4	0,9	1,0	1,1	1,2	1,1	1,3	1,3	0,8	0,3	0,2	0,2
Ebro (Tortosa)	seco	57,5	104,3	134,4	154,6	152,6	199,0	180,9	160,1	128,4	61,4	45,0	49,2
	normal	93,6	169,8	218,8	251,6	248,4	323,9	294,4	260,5	209,0	99,9	73,2	80,1
Tirón (Cuzcurrita)	seco	0,3	0,6	0,7	0,9	1,1	1,2	1,5	1,5	0,8	0,4	0,2	0,2
	normal	0,4	0,8	1,0	1,3	1,6	1,7	2,1	2,1	1,1	0,5	0,3	0,3
Arba de Biel (Erla)	seco	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	normal	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Segre (Seo Durgell)	seco	2,6	2,9	2,8	2,4	2,4	3,1	4,9	8,5	6,9	2,8	1,3	1,5
	normal	4,7	5,3	5,1	4,4	4,4	5,8	9,0	15,7	12,7	5,1	2,4	2,7
Ara (Torla)	seco	1,4	1,7	1,2	1,0	1,1	1,4	2,6	5,7	7,7	3,0	1,5	1,1
	normal	2,4	2,9	2,0	1,7	1,8	2,4	4,5	9,8	13,2	5,2	2,5	1,9
Ara (Boltaña)	seco	2,4	3,0	2,6	2,8	3,2	3,9	6,1	9,5	8,5	3,2	1,6	1,7
	normal	4,0	5,1	4,4	4,7	5,4	6,5	10,2	15,9	14,3	5,4	2,7	2,8
Isabena (Capella)	seco	0,4	0,6	0,6	0,5	0,6	0,8	0,9	1,1	0,7	0,3	0,3	0,3
	normal	1,1	1,8	1,8	1,4	1,8	2,5	2,8	3,2	2,1	0,8	0,8	0,9
Cinca (Lafortunada)	seco	4,8	5,1	4,5	3,9	3,9	4,3	7,0	13,2	15,7	10,0	5,2	4,4
	normal	6,3	6,7	5,9	5,1	5,1	5,6	9,2	17,2	20,5	13,0	6,8	5,7
Cinca (Escalona)	seco	5,9	5,5	4,8	4,7	4,8	5,3	8,5	14,5	15,2	8,2	4,7	4,6
	normal	9,6	9,0	7,8	7,6	7,9	8,5	13,8	23,5	24,7	13,4	7,7	7,5
N.Ribagorzna (Ginaste)	seco	1,0	1,1	0,8	0,7	0,6	0,9	1,4	2,5	2,8	2,1	1,4	1,0
	normal	1,2	1,3	0,9	0,9	0,8	1,0	1,7	3,0	3,3	2,5	1,6	1,2
N.Ribagorzna (P.Suert)	seco	3,2	3,7	3,0	2,8	2,8	3,4	5,3	8,2	9,6	6,2	3,7	3,4
	normal	4,2	4,8	4,0	3,7	3,6	4,4	7,0	10,8	12,6	8,1	4,9	4,4
N.Pallaresa (P.Segura)	seco	8,0	8,8	8,1	8,5	7,9	10,0	17,6	32,9	35,3	14,2	7,9	6,9
	normal	9,5	10,5	9,7	10,1	9,4	12,0	21,0	39,3	42,2	17,0	9,4	8,2
Baliera (Noales)	seco	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,9	1,3	1,0	0,4	0,3	0,3
	normal	0,5	0,7	0,5	0,5	0,6	0,7	1,1	1,7	1,3	0,5	0,3	0,3
Vallferrera (Alins)	seco	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
	normal	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1
Martín (Alcaine)	seco	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
	normal	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1

Se han calculado los REQ (incluyendo todos los parámetros hidrológicos descritos), utilizando datos diarios de caudales en estaciones de aforo “no reguladas” en algunos tramos fluviales de la Cuenca del Ebro, tratando de representar las diferentes tipologías de regímenes de caudales existentes (mostradas en la Figura 1). En las tablas anteriores

(Tablas 1a y 1b) se muestran todos los parámetros hidrológicos calculados para los tramos fluviales seleccionados.

La fluctuación anual de los caudales ecológicos, tanto en años secos como húmedos se representa en la Figura 3.

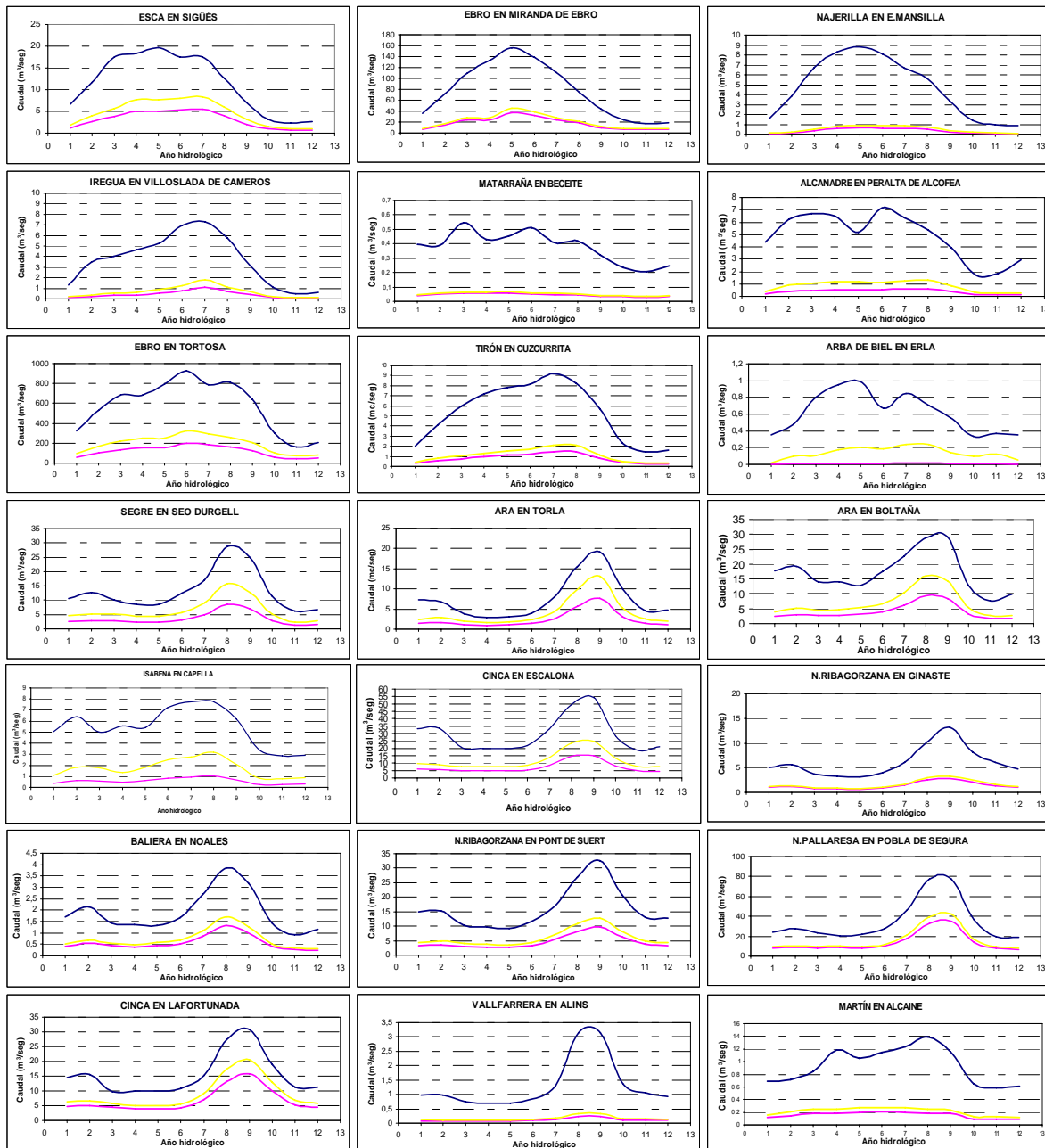


Figura 3. Fluctuación intranual: del régimen de caudal medio anual real (azul); del REQ para años normales (amarillo); y del REQ para años secos (rosa).

Del conjunto de **ríos pirenaicos** con caudales típicamente pluvio-nivales (representados en la Figura 1. con la letra “H”), se ha hecho el cálculo de los parámetros hidrológicos para **11 tramos**, se han **homogeneizado** mediante su cociente con su respectivo caudal medio anual natural y se ha calculado el **promedio**. Una vez obtenido el “**régimen ecológico de caudales estándar**” para los ríos del tipo pluvio-nival (**REQE pluvio-nival**), se ha podido definir el “**régimen ecológico de caudales**” (**REQ**) en otros ríos pertenecientes al mismo grupo, simplemente mediante la **multiplicación del REQE pluvio-nival calculado por el valor de su caudal medio anual**.

A continuación se presentan los valores del **REQE para los ríos del tipo pluvio-nival** (parámetros hidrológicos homogeneizados promedio de los 11 tramos pirenaicos seleccionados) (Tabla 2).

Tabla 2. REQE para los ríos pirenaicos (Tipo “H” nivo-pluvial en la Figura 1) de caudal característico pluvio-nival. Caudal mínimo en años secos (adimensional) (Qmin\_seco); caudal mínimo en años normales (adimensional) (Qmin\_normal); caudal máximo de estiaje en julio, agosto y septiembre (adimensional) (Qmax\_JL; QmaxAG; QmaxSP); magnitud (adimensional) (Qgen\_mag), frecuencia (años) (Qgen\_frec), momento (mes) (Qgen\_mom) y duración (días) (Qgen\_dur) del caudal generador; e intervalo de tasas de cambio de ascenso (Inter.TCA) y descenso (Inter.TCD) (adimensional).

REQE	OC	NV	DC	EN	FB	MZ	AB	MY	JN	JL	AG	SP
Seco	0,179	0,205	0,175	0,160	0,166	0,204	0,327	0,567	0,587	0,292	0,166	0,148
Normal	0,267	0,310	0,267	0,241	0,255	0,317	0,496	0,849	0,868	0,422	0,240	0,217

Qmin_seco	Qmin_normal	Qmáx_JL	Qmáx_AG	Qmáx_SP	Qgen_mag	Qgen_frec	Qgen_mom	Qgen_dur	Inter.TCA	Inter.TCD
0,144	0,207	1,088	0,636	0,629	7,167	1,857	OC_NV	1,827	(0,063/0,125)	(-0,086/-0,048)

Multiplicando esta serie estándar por el caudal medio anual del río Cinca en El Grado, se ha calculado su REQ (incluidos todos los aspectos hidrológicos característicos de este) en este tramo donde no se disponía de una serie de caudales naturales a escala diaria suficientemente larga. De igual modo que se ha hecho para el río Cinca en El Grado, podría calcularse el REQ con todos sus parámetros hidrológicos para cualquier río con un comportamiento de caudales característico pluvio-nival. Se muestran a continuación los resultados obtenidos para el río Cinca en El Grado (Tabla 3; Figura 4).

Tabla 3. REQ para el río Cinca (en El Grado) a partir del REQE nivo-pluvial.

REQ	OC	NV	DC	EN	FB	MZ	AB	MY	JN	JL	AG	SP
Seco	8,36	9,54	8,14	7,44	7,74	9,52	15,23	26,43	27,39	13,61	7,76	6,89
Normal	12,47	14,46	12,46	11,26	11,91	14,79	23,12	39,59	40,46	19,65	11,21	10,11

Qmín_ seco	Qmín_ normal	Qmáx_ JL	Qmáx_ AG	Qmáx_ SP	Qgen_ mag	Qgen_ frec	Qgen_ mom	Qgen_ dur	Inter. TCA	IntervTCD
6,722	9,660	50,720	29,661	29,337	334,150	2	OC_NV	2	(2,938/5,808)	(-3,987/-2,249)

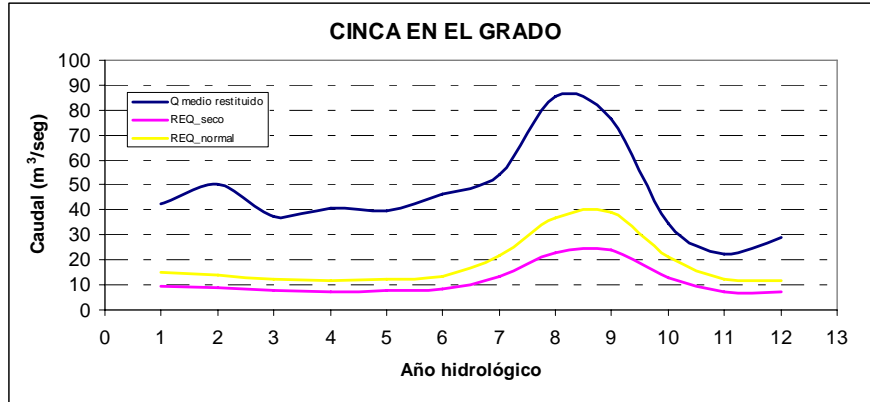


Figura 4. Fluctuación intranual del régimen de caudal del río Cinca en El Grado: medio anual real (azul); REQ para años normales (amarillo); REQ para años secos (rosa).

Con un elevado número de estaciones de aforo con una serie de datos diarios “no regulados” superior a 20 años en cada grupo de caudales definido para la Cuenca del Ebro, podría calcularse un REQE por grupo, que serviría para conocer el REQ de aquellos tramos fluviales carentes de datos completando así la totalidad de la cuenca.

### 5.2.- Regímenes ecológicos a escala de tramo fluvial

Se ha estudiado el “hábitat potencial útil” para la “**especie indicadora**” **trucha común** (*Salmo trutta*) para distintos caudales circulantes en el tramo inmediatamente aguas abajo de la presa del Grado en el río Cinca (Marchamalo et al. 2007), para finalmente definir un “caudal mínimo” necesario para la conservación de las comunidades acuáticas ahí presentes.

Una simulación hidráulica con el programa GUAD 2D (desarrollado por Inclam S.A y CPS (Universidad de Zaragoza)) proporcionó los valores de profundidad del agua, nivel y velocidad en dos dimensiones (x, y) en cada pixel. Como topografía del tramo se usó un DTM obtenido mediante LIDAR (vuelo realizado por la Confederación Hidrográfica del Ebro), y se consideró una textura de gravas dominante.

La preferencia de cada estado vital de la trucha común por la profundidad, velocidad y sustrato se evaluó usando las “curvas de preferencia” desarrolladas por García de Jalón (1999) y Mayo (2000) para España. Se calculó el “Índice Combinado de Adecuación” (“Composite Suitability Index”) (Ecuación 1) a las preferencias, para cada píxel mojado como la media geométrica de las tres preferencias para finalmente obtener el “Hábitat Potencial Util” (Weighted Usable Area) (Bovee, 1982) para cada estado vital de la trucha común bajo diferentes caudales como un agregado del producto del CSI evaluado en cada píxel y el área del píxel.

En las gráficas siguientes (Figura 5) se muestra, por un lado el HPU para cada estado vital de la trucha común. Por otro, el HPU expresado en unidad de área para adulto tras transformación. Por último se muestra una ampliación de la parte inferior de la curva correspondiente al estado más exigente, adulto, donde se indican los valores de caudal mínimo seleccionados como los extremos del segmento de cambio de pendiente. El “caudal mínimo de años normales” corresponde a  $10,2 \text{ m}^3/\text{seg}$ , y el “caudal mínimo de años secos” corresponde a  $5,5 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

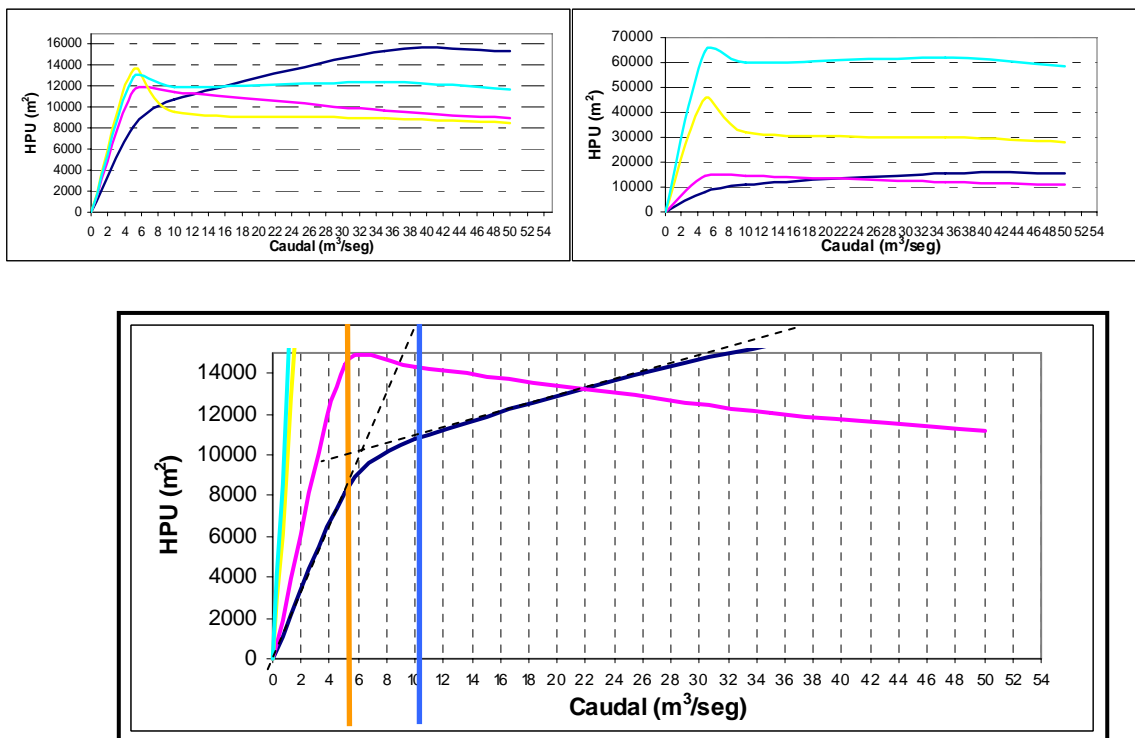


Figura 5. Arriba derecha) HPU para la trucha común (*Salmo trutta*) adulto (azul), juvenil (rosa), alevín (amarillo) y frezaderos (celeste). Arriba izquierda) HPU expresado en unidad de área para adulto tras transformación: Juvenil/Adulto 0,8; Alevín/Adulto 0,3; Frezaderos/Adulto 0,2). Abajo) Ampliación de la zona de la curva en el que cambia la pendiente. **Línea naranja:  $Q_{\text{mín\_seco}}: 5,5 \text{ m}^3/\text{seg}$ ; línea celeste:  $Q_{\text{mín\_normal}}: 10,2 \text{ m}^3/\text{seg}$ .**

### 5.3.- Discusión

En la tabla siguiente (Tabla 4) se muestra la aportación anual natural real de los ríos en las estaciones seleccionadas. Se muestra también la aportación anual natural propuesta como restricción ecológica tanto para años normales como para años particularmente secos según la metodología hidrológica de los percentiles aplicada, así como el porcentaje que éstas representan respecto a la aportación anual natural real.

El porcentaje reservado a caudales ecológicos para cada tramo fluvial estudiado es variable en función del tipo de régimen hidrológico que cada uno posee. Las reservas mayores se aprecian en los ríos pirenaicos, que suponen alrededor del 36% de la aportación anual natural total durante períodos normales y el 25% durante períodos especialmente secos. La reserva ecológica en el resto de tramos fluviales estudiados supone en torno al 25% de la aportación anual natural total en años normales y aproximadamente el 10% en años secos. En estos porcentajes, no se ha tenido en cuenta la aportación que corresponde a la avenida diseñada cada 2 ó 5 años de período de retorno y que supondría un aumento de las reservas ecológicas.

La aplicabilidad del método de los percentiles a ríos temporales es limitada debido a la alta posibilidad de la aparición de valores nulos para los percentiles de los índices de Ritcher utilizados en el cálculo de los parámetros hidrológicos. En los casos en que esto suceda, se recomienda la utilización de estadísticos paramétricos como la media. Se ha calculado el “régimen ecológico de caudales” para el río temporal Arba de Biel mediante el método de los percentiles y se aprecia claramente que la reserva ecológica en años secos es prácticamente inexistente.



Tabla 4. Porcentajes reservados a caudales ecológicos (tanto en años secos como en normales) respecto a la aportación anual real obtenidos mediante método hidrológico.

Río	Ap an RR (hm <sup>3</sup> )	Ap an REQ_seco (hm <sup>3</sup> )	Ap an REQ_normal (hm <sup>3</sup> )	REQ_seco vs RR (%)	REQ_normal vs RR (%)
Esca	353,77	95,88	144,42	27,1	40,8
Ebro (Miranda)	2422,18	540,79	653,14	22,3	27,0
Najerilla	145,77	10,62	14,94	7,3	10,3
Iregua	114,20	12,93	20,37	11,3	17,8
Matarraña	11,82	1,37	1,61	11,6	13,6
Alacanadre	151,36	11,69	26,05	7,7	17,2
Ebro (Tortosa)	17730,05	3698,31	6018,90	20,9	33,9
Tirón	165,47	24,51	34,24	14,8	20,7
Arba de Biel	19,26	0,27	4,33	1,4	22,5
Segre	408,81	108,49	200,34	26,5	49,0
Ara (Torla)	232,35	76,25	130,79	32,8	56,3
Ara (Boltaña)	533,75	125,42	210,94	23,5	39,5
Isabena	169,64	18,03	54,08	10,6	31,9
Cinca (Lafortunada)	480,22	212,75	277,22	44,3	57,7
Cinca (Escalona)	917,95	224,73	365,14	24,5	39,8
N.Rib. (Ginaste)	189,70	42,54	50,14	22,4	26,4
N.Rib. (P.Suert)	502,60	143,50	187,92	28,6	37,4
N.Pallaresa	1092,59	430,17	513,79	39,4	47,0
Baliera	59,41	17,77	22,57	29,9	38,0
Vallfarrera	41,06	3,52	5,11	8,6	12,4
Martín	29,19	4,82	6,58	16,5	22,5

Por otro lado, si comparamos los resultados obtenidos mediante la aplicación del “régimen ecológico de caudales estandarizado” característico de ríos pluvio-nivales (REQE pluvio-nival) para el cálculo del “régimen ecológico de caudales” (REQ) en el río Cinca en El Grado, con los obtenidos mediante simulación del hábitat en este mismo tramo, se observa que los caudales mínimos tanto de años normales como de años secos oscilan dentro de un rango de valores similar. Esto confirma la validez del uso del REQE para el cálculo de caudales ecológicos en tramos fluviales sin datos diarios no regulados suficientes.

Por último, las dos metodologías aquí descritas se complementan, pero también pueden aplicarse de forma independiente en función de los objetivos perseguidos, teniendo en cuenta que:

❖ **Metodología de los percentiles:**

- Ventaja: conocimiento del REQ en cualquier punto de la cuenca de forma rápida y sencilla.
- Desventaja: no atiende a las particularidades de cada tramo fluvial.

❖ **Metodología de simulación del hábitat:**

- Ventaja: atienden a las particularidades de cada tramo.
- Desventaja: costosa y tediosa su aplicación a todos los segmentos fluviales de la Cuenca del Ebro.

## 6.- Bibliografía

**Arthington, A.H. y B.J. Pusey.** 2003. Flow restoration and protection in Australian rivers. *River Research and Applications* 19 (5-6): 377-395.

**Baeza, D. y D. García de Jalón.** 2005. Caracterización del régimen de caudales en ríos de la Cuenca del Tajo atendiendo a criterios biológicos. *Journal of Hydrology*, 310. Sigues 1-4: 266-279.

**Bejarano, M.D.** 2007. *Caracterización y clasificación jerárquica de la red fluvial de la Cuenca del Ebro*. Trabajo de Investigación Tutelada. Universidad Politécnica de Madrid.

**Bovee, K.D.** 1982. *A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*. Instream Flow Information Paper 12. USDI Fish Wildl. Serv., Office of Biol. Serv. FWS/OBS-82/26: 248 pp.

**Bunn S.E.; A.H. Arthington.** 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30, (4): 492-507.

**Cubillo, F., C. Casado, V. Castillo.** 1990. *Caudales ecológicos. Estudios de regímenes de caudales mínimos en los cauces de la Comunidad de Madrid*. Agencia de Medio Ambiente. Comunidad Autónoma de Madrid.

**Docampo, L & G. de Bikuña, B.** 1993. The Basque Method for determining Instream Flows in Northern Spain. *Rivers, Studies in the Science, Environmental Policy and Law of Instream Flow*, 4(4): 292-311.

**García de Jalón, D.** 1999. *Medidas correctoras en minicentrales hidroeléctricas*. En: Manal práctico sobre minicentrales hidroeléctricas. Pp: 47-66. Asociación Española para la Mejora de los Salmónidos (AEMS). Madrid. España.

**García de Jalón, D., M. González del Tánago, C. Casado.** 1992. Ecology of regulated streams in Spain: An Overview. *Limnética*, 8: 161-166. Asociación Española de Limnología. Madrid.

- García de Jalón, D.; R. Sánchez; J. Serrano.** 2007. *Alteraciones de los regímenes de caudales de los ríos.* Mesas de Trabajo. Estrategia Nacional de Restauración de Ríos. Ministerio de Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Madrid.
- García de Jalón, D.** 1990. Técnicas hidrobiológicas para la fijación de caudales ecológicos mínimos. EN: Ramos, A., Notario, A., Baragaño, J.R. (eds): *Libro homenaje al profesor D.M. García de Viedma*: 183-196. FUCOVASA, UPM. Madrid.
- García de Jalón, D.** 2003. The Spanish Experience in Determining Minimum Flow Regimes in Regulated Rivers. *Canadian Water Resources Journal*. Vol. 28, No2.
- Kondolf, G.M.** 1997. Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environmental Management*, 21 (4): 533-551.
- Ligon, F.K., W.E. Dietrich, W.J. Trush.** 1995. Downstream ecological effects of dams. *BioScience*. 45(3): 183-192.
- Magdaleno, F.** 2005. *Caudales ecológicos: conceptos, métodos e interpretaciones.* Monografías. CEDEX, Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente. España.
- Marchamalo, M.; M.D. Bejarano; D. García de Jalón; Martínez, R.** 2007. *Fish habitat characterization and quantification using LIDAR and convencional topographic information in river survey.* Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology. Proc. of SPIE Vol. 6742, 67420L-1.
- Mayo, M.** 2000. *Determinación de regímenes de caudales ecológicos mínimo: adaptación de métodos IFIM-PHABSIM y aplicación a los ríos españoles.* Tesis de Doctorados. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Munné, A. y N. Bonada.** 2006. *Establecimiento de caudales ambientales en ríos temporales, intermitentes y efímeros.* En: Instrucción sobre caudales ambientales para el Ministerio de Medio Ambiente, España.
- Munné, A. y N. Prat.** 1997. Caudal y calidad biológica de las aguas del río Anoia. *Tecnología del agua*, 160: 32-46.
- Nilsson, C., K. Berggren.** 2000. Alterations of riparian ecosystems caused by river regulation. *BioScience* 50: 783-792.
- Palau, A.** 1994. Los mal llamados caudales ecológicos. Bases para un propuesta de cálculo. *Obra Pública*, 28 (Ríos II): 84-95.
- Palau, A. et al.** 1998. *El Caudal Básico. Método para la Gestión Hidrobiológica de Ríos Regulados.* Dep. Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Universidad de Lleida – CEDEX. Lleida.

- Palau, A. y J. Alcázar.** 1996. The Basic Flow: An alternative approach to calculate minimum environmental instream flows. Proc. 2<sup>nd</sup> *International Symposium on Habitat Hydraulics* 2000. Vol. A: 547-588. Québec, Canadá.
- Petts, G.E.** 1984. *Impunded Rivers: Perspectives for Ecological Management*. John Wiley & Sons, Chichester (UK).
- Poff, N.L., J.D. Allan, M.B. Bain, J.R. Karr, K.L. Prestegard, B.D. Richter, R.E. Sparks, y J.C. Stromberg.** 1997. The Natural Flow Regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*. 47: 769-784.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V, Wiginton, R Y Braun, D.P.** 1997. How much water does a river need?. *Freshwater Biology*, **37**, 231-249.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J., And Braun, D.P.** 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, **10**, 1163-1174.
- Rood S.B., J.M. Mahoney, D.E. Reid, y L. Zilm.** 1995. Instream flows and the decline of riparian cottonwoods along the St. Mary River, Alberta. *Canadian Journal of Botany*, 73: 1250-1260.
- Sánchez, R.** 2000. *El método del Caudal Básico. Análisis de criterios de cálculo y aplicación para la obtención de caudales ecológicos*. DMACS. Universidad de Lleida.
- Sánchez, R.** 2007. *Criterios para la Implantación de Caudales Ecológicos*. Informe para el Plan Hidrológico del Ebro. Unidad de Ecosistemas Acuáticos. IRTA.
- Suárez, M.L., M.R. Vidal-Abarca, R. Gómez, y L. Ramírez-Díaz.** 1995. *Las avenidas de agua en la configuración de los paisajes de regiones áridas y semiáridas: Consideraciones sobre las obras de control*. VI Jornadas sobre el Paisaje: Agua y Paisaje. Asociación para el Estudio del Paisaje. Segovia (España).
- Ward, J.V y Stanford, J.A.** 1979. *The ecology of regulated streams*. Plenum Press. New York. No. 33757, pp. 409. 1979.

## 7.- Agradecimientos

Mis agradecimientos a Ignacio Vizcaino, cuyos datos de índices de alteración hidrológica de Ritcher han sido utilizados para este estudio de caudales ecológicos; a Miguel Marchamalo, por su colaboración en los estudios del hábitat en el río Cinca bajo la presa de El Grado; y a Diego García de Jalón por su supervisión.

## **Anexo 1. Método de los percentiles: protocolo metodológico**

### **1.- Cálculo del “régimen ecológico de caudales estandarizado” para cada tipología de caudal descrita en la Cuenca del Ebro.**

1.1.- **Selección de estaciones de aforo** con una serie de datos de caudal diarios no regulados superior a 20 años.

1.2.- **Cálculo de los parámetros hidrológicos que constituyen el “régimen ecológico de caudales” (REQ)** mediante los parámetros de Ritche (Ritche et al, 1996, 1997), para las estaciones seleccionadas.

#### Caudal mínimo:

Años normales: pct10 “Qmin90d”

Años secos: pct10 “Qmin30d”

#### Régimen de caudales:

Años normales: Qmediano mensual de la serie \* factor proporcionalidad de años normales

Años secos: Qmediano mensual de la serie \* factor proporcionalidad de años secos

#### Caudal máximo de estiaje:

Ríos permanentes: pct75 “Qjul”, “Qag”, “Qsep”

Ríos temporales: pct75 “Qjul”, “Qag”, “Qsep”, más 30 días de caudal repartidos entre los meses de julio, agosto y septiembre (mín.5 días/mes).

#### Caudal generador:

Magnitud y Frecuencia: ajuste a una función de distribución Gumbel de la serie del parámetro “1daymax”, y selección de los caudales correspondientes a T2 en ríos con coeficientes de variación bajos, y T5 en los altos.

Momento: pct75 “date of maximun”

Duración: pct10 “high pulse duration”

Tasas de cambio: intervalo pct25-pct75 “Rise Rate” (ascenso) y “Fall Rate” (descenso)

Caudal de acondicionamiento: incremento del Qmin en un 10%

1.3.- **Homogeneización** de los parámetros hidrológicos calculados para cada estación seleccionada mediante su cociente con su respectivo caudal medio anual no regulado.

1.4.- **Cálculo del “régimen ecológico de caudales estandarizado” (REQE) para cada uno de los tipos de regímenes hidrológicos** descritos para la Cuenca del Ebro, como el promedio de los parámetros hidrológicos homogeneizados de las estaciones pertenecientes a la misma tipología de régimen de caudales.

## **2.- Cálculo del “régimen ecológico de caudales” en cualquier tramo fluvial de la Cuenca del Ebro.**

2.1.- **Asignación** del tramo cuyo REQ se desea conocer, a una de las 10 tipologías de caudal descritas para la Cuenca del Ebro.

2.2.- **Cálculo del caudal medio anual natural del tramo** (mediante datos reales de una estación “no regulada” o mediante restitución con modelos).

2.3.- **Cálculo del “régimen ecológico de caudales” (REQ) en el tramo** de estudio, mediante el producto de su caudal medio anual natural con cada uno de los parámetros hidrológicos estándar característicos del grupo de caudal al que pertenece (REQE de su tipología).