

# **El Método del Caudal Básico para la determinación de Caudales de Mantenimiento Aplicación a la Cuenca del Ebro**

Tesis Doctoral presentada por

**Jorge Alcázar Montero**

Bajo la dirección del

Dr. ANTONI PALAU IBARS



Universitat de Lleida  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària  
Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl

Lleida, Abril de 2007

# Agradecimientos

El largo camino recorrido para completar esta Tesis me ha permitido conocer a mucha gente que, en mayor o menor medida, ha contribuido a la buena consecución de la misma, y a la cual quiero agradecer su inestimable colaboración.

En primer lugar a mi Director de tesis, Antoni Palau Ibars, por introducirme y darme la oportunidad de trabajar en el apasionante mundo de los caudales ecológicos, así como por dirigir a buen fin mis trabajos, dando interesantes recomendaciones y orientando y corrigiendo los resultados obtenidos.

El trabajo de campo no hubiera sido posible sin la colaboración de Antoni Palau, César Alcácer, Jordi Roi y Rafa Sánchez, con los cuales he compartido largas jornadas de viaje y remojones en ríos.

Mención especial merecen José Antonio Martínez, Cristina Vega y Silvia Espinal, por su paciencia e instrucción en los Sistemas de Información Geográfica. Cristina Vega puso a mi disposición su conocimiento y experiencia en Redes Neuronales Artificiales, así como también Ricardo Blanco las suyas en los análisis estadísticos. M.A. Colomer, Joseph Gelonch y Joan Cecilia atendieron con amabilidad mis consultas, al igual que los miembros del Departamento de Estadística e Investigación Operativa de la E.T.S.I. Industriales de la U.P.C. Todos ellos han hecho posible que saliera, si no victorioso, al menos airoso de las largas sesiones de lucha contra la informática.

También quiero agradecer a mis compañeros del Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo su apoyo y consejos prestados, así como a la Universidad de Lleida las facilidades que me han dado para que pudiera sacar el tiempo necesario en el tramo final a través del Programa *Doctora Martina Castells* de ayuda para la finalización de tesis doctorales.

Por último, no puedo olvidarme de mi familia, especialmente mi mujer y mis hijos, por su paciencia y comprensión en todo momento.

A mi padre, *in memoriam*, y a mi madre

A mi mujer Cristina  
y a mis hijos Ana, Inés y Rodrigo

## Resumen

La determinación de caudales ecológicos en ríos regulados se ha convertido en uno de los principales problemas a tener en cuenta en la ordenación y gestión de recursos hídricos en los países desarrollados del ámbito mediterráneo. Existen numerosas metodologías para la determinación de caudales ecológicos, pero para su correcta aplicación normalmente requieren de una extensa base de datos con registros completos de caudales (muchas veces inexistentes, sobre todo en cuencas no instrumentadas) y/o de un trabajo de campo para conseguirlos que a veces puede ser muy exigente en tiempo y costes asociados, especialmente en la ordenación de recursos hídricos de grandes cuencas.

En la presente memoria se pretende avanzar en el conocimiento de dos de los principales problemas que rodean el concepto y determinación de los caudales ecológicos. En primer lugar, la búsqueda de una metodología que pueda llegar a ser de general aceptación, a través del análisis del Método del Caudal Básico. Así, se han evaluado los principales aspectos del método en términos de objetividad, sencillez, universalidad y fundamentación científica, contrastando los resultados obtenidos desde un punto de vista hidrológico e hidráulico.

En segundo lugar, se busca la aplicación de esta metodología de una forma extensiva a la Cuenca Hidrográfica del Ebro, incluyendo situaciones donde no se tengan estaciones de aforo ni otro tipo de datos de campo. Para ello, se ha realizado primero una regionalización de la cuenca en zonas homogéneas, identificando en cada una de ellas las principales variables relacionadas con el Caudal Básico y obteniendo ecuaciones de predicción del mismo. Por último, se han examinado algunos modelos y/o herramientas que han dado buenos resultados en la predicción y modelización de variables (en concreto las redes neuronales artificiales), para ver su posible validez en la estimación del Caudal Básico.

## Resum

La determinació de cabals ecològics en rius regulats s'ha convertit en un dels principals problemes a tenir en compte en l'ordenació i gestió de recursos hídrics als països desenvolupats de l'àmbit mediterrani. Existeixen nombroses metodologies per a la determinació de cabals ecològics, però per a la seva correcta aplicació normalment requereixen d'una extensa base de dades amb registres complets de cabals (moltes vegades inexistents, sobretot en conques no instrumentades) i/o de un treball de camp per aconseguir-los que de vegades pot ser molt exigent en temps i costos associats, especialment en l'ordenació de recursos hídrics de grans conques.

En la present memòria es pretén avançar en el coneixement de dos dels principals problemes que envolten el concepte i determinació del cabals ecològics. En primer lloc, la recerca de una metodologia que pugui arribar a ser de general acceptació, a través de l'anàlisi del Mètode del Cabal Bàsic. Així, s'han avaluat els principals aspectes del mètode en termes d'objectivitat, senzillesa, universalitat i fonamentació científica, contrastant els resultats obtinguts des d'un punt de vista hidrològic i hidràulic.

En segon lloc, es busca l'aplicació d'aquesta metodologia d'una forma extensiva a la Conca Hidrogràfica de l'Ebre, incloent situacions on no es tinguin estacions d'aforament ni un altre tipus de dades de camp. Per a això, s'ha realitzat primer una regionalització de la conca en zones homogènies, identificant en cada una d'elles les principals variables relacionades amb el Cabal Bàsic i obtenint equacions de predicció del mateix. Finalment, s'han examinat alguns models i/o eines que han donat bons resultats en la predicció i modelització de variables (en concret les xarxes neuronals artificials), per veure la seva possible validesa en l'estimació del Cabal Bàsic.

## Summary

Environmental flow determination in regulated rivers has become a major issue for watershed management in Mediterranean developed countries. There are many existing methodologies for environmental flows determination, but they usually require accurate hydrological long-term flow records, which sometimes are unavailable (ungauged catchments), and/or extensive field measurement campaigns, which can be very costly especially when managing water resources in large basins.

The aim of this memory is to advance in the knowledge of two of the main problems related to the concept and determination of environmental flows. First, the search for a worldwide accepted technique to establish environmental flows, through the analysis of the Basic Flow Methodology. So, the main aspects of this methodology concerning objectivity, simplicity, universality and scientific bases have been evaluated. Results were also tested for hydraulic and hydrological significance.

Second, the operational application of this methodology to the Ebro River basin, including river reaches without gauging stations or another type of field data. A previous regionalization of the watershed in homogenous zones was made, identifying the main variables related to the Basic Flow in each zone and obtaining separated equations for environmental flow prediction. Finally, some models and/or tools which have shown good results in the prediction and modelling of variables (in particular the artificial neuronal networks) have been examined, to test their possible application in Basic Flow estimation.

## **Prólogo**

La elaboración de la presente tesis doctoral comenzó a mediados de los años 90, y en la misma se recogen trabajos que se han ido desarrollando durante todo este tiempo. Cada uno de estos trabajos ha contribuido en mayor o menor medida al conocimiento de la problemática de los caudales ecológicos, y se ha desarrollado a partir del conocimiento del medio y las bases de datos disponibles en ese momento. Es por ello que las bases de datos utilizadas no se corresponden con los registros de datos de los últimos años, existiendo en la actualidad registros con datos posteriores a los utilizados para la elaboración de los trabajos aquí expuestos. No obstante, dadas las características y naturaleza del estudio, que pretende estudiar metodologías y aplicabilidad de nuevas herramientas al cálculo de los caudales ecológicos, éste se puede llevar a cabo con cualquier base de datos reales siempre que cumpla con los requisitos necesarios, por lo que los resultados obtenidos pueden considerarse atemporales y válidos.

# INDICE

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 EL PROBLEMA DE LOS CAUDALES ECOLÓGICOS .....	2
1.2 ANTECEDENTES DE METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS.....	3
1.2.1 Métodos hidráulicos.....	5
1.2.1.1 Método del perímetro mojado (Collings, 1972; Nelson, 1984).....	5
1.2.1.2 Otros métodos hidráulicos.....	7
1.2.1.3 Discusión.....	7
1.2.2 Métodos hidrológicos.....	7
1.2.2.1 Método Montana (Tennant, 1976).....	7
1.2.2.2 Fórmula de Matthey y fórmulas asociadas.....	10
1.2.2.3 Método del $Q_{7,10}$ (Stalnaker y Arnette, 1976).....	10
1.2.2.4 Otros métodos hidrológicos.....	10
1.2.2.5 Discusión.....	11
1.2.3 Métodos hidrobiológicos.....	12
1.2.3.1 Métodos empíricos.....	12
1.2.3.1.1 Método del índice de calidad de hábitat (HQI).....	12
1.2.3.1.2 Otros métodos empíricos.....	15
1.2.3.2 Métodos basados en la simulación de hábitats.....	15
1.2.3.2.1 Modelo conceptual del PHABSIM.....	16
1.2.3.2.2 Criterios de preferencia de hábitat.....	17
1.2.3.2.3 Modelo de hidráulica fluvial.....	18
1.2.3.2.4 Criterios para el establecimiento de caudales mínimos.....	18
1.2.3.2.5 Ventajas y limitaciones.....	19
1.2.3.2.6 Otros métodos hidrobiológicos.....	20
1.2.4 Métodos holísticos.....	20
1.2.4.1 Building Block Methodology (BBM) (King y Louw, 1998; King <i>et al.</i> , 2000).....	20
1.2.4.2 Otros métodos holísticos.....	21
1.2.4.3 Ventajas y limitaciones.....	22
1.2.5 Otros métodos.....	23
1.3 ANTECEDENTES DE REGIONALIZACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS.....	23
1.4 OBJETIVOS.....	25
<b>CAPÍTULO 2. EL MÉTODO DEL CAUDAL BÁSICO.....</b>	<b>29</b>
2.1 FUNDAMENTOS DE LA METODOLOGÍA.....	30
2.2 EL CAUDAL BÁSICO Y EL RÉGIMEN DE CAUDALES DE MANTENIMIENTO.....	30
2.2.1 El Caudal Básico ( $Q_b$ ).....	30
2.2.2 El Caudal de Acondicionamiento ( $Q_a$ ).....	32
2.2.3 El Caudal de Mantenimiento ( $Q_m$ ).....	32
2.2.4 El caudal generador.....	33
2.2.5 El caudal máximo.....	35
2.2.6 Tasa de Cambio de Caudal en la Unidad de Tiempo.....	35
2.2.7 Calidad del agua suministrada.....	37
2.2.8 El regimen de caudales de mantenimiento.....	37
2.3 VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL MÉTODO.....	38
<b>CAPÍTULO 3. MATERIAL Y MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
3.1 ANÁLISIS DEL MÉTODO DEL CAUDAL BÁSICO.....	42
3.1.1 Análisis de la serie de datos de partida.....	44
3.1.2 El año hidrobiológico.....	44
3.1.3 Número de años considerados para el cálculo de $Q_b$ y su validez temporal.....	45
3.1.4 Proceso de cálculo del caudal básico.....	46
3.1.5 Tasa de cambio de caudal en el tiempo.....	46
3.1.6 El caudal de mantenimiento.....	46
3.1.7 Significación hidrológica del Caudal Básico.....	47
3.1.8 Condiciones hidráulicas generadas por el Caudal Básico.....	48
3.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL CAUDAL BÁSICO A LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL EBRO.....	53
3.2.1 Fuentes de información y selección de estaciones de aforo.....	53
3.2.2 selección de variables.....	56



3.2.3 análisis de datos.....	57
3.3 APLICACIÓN DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA) A LA DETERMINACIÓN DE QB.....	59
3.3.1 Introducción.....	59
3.3.2 Área de estudio, naturaleza y características de las variables.....	60
3.3.3 Arquitectura de las redes neuronales.....	61
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>65</b>
4.1 ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CÁLCULO DEL $Q_b$ .....	66
4.1.1 Análisis de la serie de datos de partida.....	66
4.1.1.1 Discontinuidades en la serie de datos de partida.....	66
4.1.1.2 Posibles errores en los datos de partida.....	67
4.1.2 El año hidrobiológico.....	69
4.1.3 Número de años considerados para el cálculo de $Q_b$ y su validez temporal.....	73
4.1.4 Proceso de cálculo del caudal básico.....	76
4.1.5 Número de orden de las medias móviles.....	81
4.1.6 Tasa de cambio de caudal en el tiempo.....	81
4.1.7 El Caudal de Mantenimiento.....	87
4.1.8 Significación hidrológica del Caudal Básico.....	88
4.1.9 Condiciones hidráulicas generadas por el Caudal Básico.....	91
4.1.9.1 Morfometría e hidráulica de los tramos estudiados en las condiciones de muestreo.....	91
4.1.9.2 Simulación de Caudales Básicos.....	93
4.1.9.3 Variación de hábitat potencial útil.....	100
4.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL CAUDAL BÁSICO A LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL EBRO.....	101
4.2.1 Regionalización de la cuenca del ebro en función del $Q_b$ .....	101
4.2.1.1 Análisis en función de variables descriptoras de la cuenca vertiente.....	103
4.2.1.2 Análisis en función de variables descriptoras de la hidrología general.....	106
4.2.1.3 Análisis en función de variables relacionadas con la curva de caudales clasificados y su relación con $Q_b$ .....	109
4.2.1.4 Análisis en función de variables resultado del análisis de periodos de caudales mínimos.....	112
4.2.1.5 Análisis en función de variables que expresan variabilidad.....	115
4.2.1.6 Regionalización global.....	117
4.2.2 Determinación del $Q_b$ en las distintas zonas homogéneas.....	124
4.2.2.1 Discusión.....	126
4.2.3 Aplicación práctica de determinación del $Q_b$ en la cuenca del Ebro.....	127
4.3 APLICACIÓN DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA) A LA DETERMINACIÓN DE QB EN LA CUENCA DEL EBRO.....	129
4.3.1 Construcción de rna a partir de base de datos general.....	129
4.3.2 Construcción de rna a partir de la base de datos reducida (9 variables).....	133
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>137</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>145</b>
<b>Anexo 1. Listado de variables relacionadas con caudales de mantenimiento.....</b>	<b>159</b>
<b>Anexo 2. Variación del área ponderada útil (APU) al aplicar los valores de <math>Q_b</math> respecto al mínimo caudal medio mensual.....</b>	<b>167</b>

## **Capítulo 2. El Método del Caudal Básico**

2.1 Fundamentos de la metodología

2.2 El caudal básico y el Régimen de caudales de Mantenimiento

2.2.1 El Caudal Básico ( $Q_b$ )

2.2.2 El Caudal de Acondicionamiento ( $Q_a$ )

2.2.3 El Caudal de Mantenimiento ( $Q_{mt}$ )

2.2.4 El Caudal Generador

2.2.5 El Caudal Máximo

2.2.6 Tasa de cambio de caudal en la unidad de tiempo

2.2.7 Calidad del agua suministrada

2.2.8 El Régimen de Caudales de mantenimiento

2.3 Ventajas y limitaciones del método

## **2.1 FUNDAMENTOS DE LA METODOLOGÍA**

Los sistemas naturales son compartimentos de la biosfera regulados y organizados de acuerdo a una información que se presenta en flujos, tanto continuos como discontinuos. Esta información se estructura en series de datos en forma de gradientes espaciales o temporales, y es interpretada por los organismos naturales para definir sus características abióticas, su composición biológica, su organización y funcionamiento (Margalef, 1991). Un ejemplo de este hecho lo constituye la vida misma, la cual se organiza y transmite a través de información recogida en series de datos, el código genético contenido en el DNA.

Los estudios de hábitat físico en ríos se han centrado tradicionalmente en los requerimientos de los peces. Las principales variables utilizadas para caracterizar esos hábitats y, por lo tanto, utilizadas para determinar caudales mínimos son el tipo y distribución de los materiales del lecho y la hidráulica del cauce (profundidad y velocidad del agua principalmente), aunque a veces también se han utilizado otros parámetros tales como disponibilidad de alimento, tipo y composición de las orillas (refugio) y calidad del agua. Al estar todas estas variables relacionadas con el régimen de caudales, podemos considerarlas como variables dependientes del caudal circulante (variable independiente). Así, el régimen de caudales determina las características actuales de los ríos, y las series históricas recientes de registros de caudales son, de alguna forma, el DNA del río (genotipo) y contienen toda la información necesaria para definir el funcionamiento biológico del sistema. Lo único que hay que hacer es encontrar una forma de “leer” la información acumulada en dichas series (Palau, 1994).

La metodología del Caudal Básico se propone como posible herramienta para descifrar esa información (Palau, 1994), e incluye una serie de conceptos que cubren diferentes aspectos importantes en la gestión de los ríos. El conjunto de todos estos conceptos crean la idea final de “Regimen de Caudales de Mantenimiento” que, lejos de constituir un simple caudal mínimo, representa una propuesta de gestión racional múltiple para la conservación de ríos regulados. Estos conceptos de la formulación original del método se sintetizan en los siguientes apartados.

## **2.2 EL CAUDAL BÁSICO Y EL RÉGIMEN DE CAUDALES DE MANTENIMIENTO**

### **2.2.1 EL CAUDAL BÁSICO ( $Q_B$ )**

Se define como el caudal mínimo a mantener en el cauce, siempre que éste sea mayor al caudal natural que debería circular en ese momento (en caso contrario, el caudal mínimo sería el caudal natural). Es el elemento clave de la propuesta puesto que corresponde al caudal mínimo necesario para que se conserve la estructura y función del ecosistema acuático afectado, y buena parte del resto de parámetros derivan o están condicionados por él. Se deduce del estudio de discontinuidades en la tendencia de variación de los caudales mínimos, obtenidos a partir de la aplicación de medias móviles a series anuales seleccionadas de caudales medios diarios (Palau, 1994; Palau y Alcázar, 1996).

Los datos de partida para el cálculo del Qb son los registros históricos de las series de caudales medios diarios, “ $q_i^j$ ”, donde “ $j$ ” son los distintos años considerados (se recomienda un mínimo de 10 años), e “ $i$ ” son los días del año y por lo tanto varía de 1 a 365. De esta forma se obtiene una matriz 365 x 10 de caudales medios diarios (figura 2.1).

Sobre cada columna de esta matriz (que responde a cada uno de los años considerados), y empezando por el último año disponible (más actual), se calculan las medias móviles sobre intervalos de orden crecientes (retardos) comenzando en 1 (medias de datos tomados de 1 en 1) hasta un máximo de 100 (medias de datos tomadas de 100 en 100), siguiendo por tanto un procedimiento similar al utilizado en el método del  $Q_{7,10}$  (Stalnaker y Arnette, 1976) comentado en el apartado 1.2.2.3. De esta forma se obtienen “ $j$ ” tablas trapezoidales de 100 columnas y un número de filas que va de 365 en la primera columna (medias móviles de orden 1) a 266 en la última columna (medias móviles de orden 100).

Cada elemento de esta matriz triangular corresponde por tanto a una media móvil que tiene la expresión matemática siguiente:

$$\mu_{p,s}^j = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^{k=s} q_{p+k-1}^j \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde “ $s$ ” es el intervalo escogido de media móvil (varía de 1 a 100), “ $p$ ” es el número de orden de la media móvil dentro de cada columna de la matriz (varía de 1 a 366 –  $s$ ) y “ $j$ ” es el año considerado.

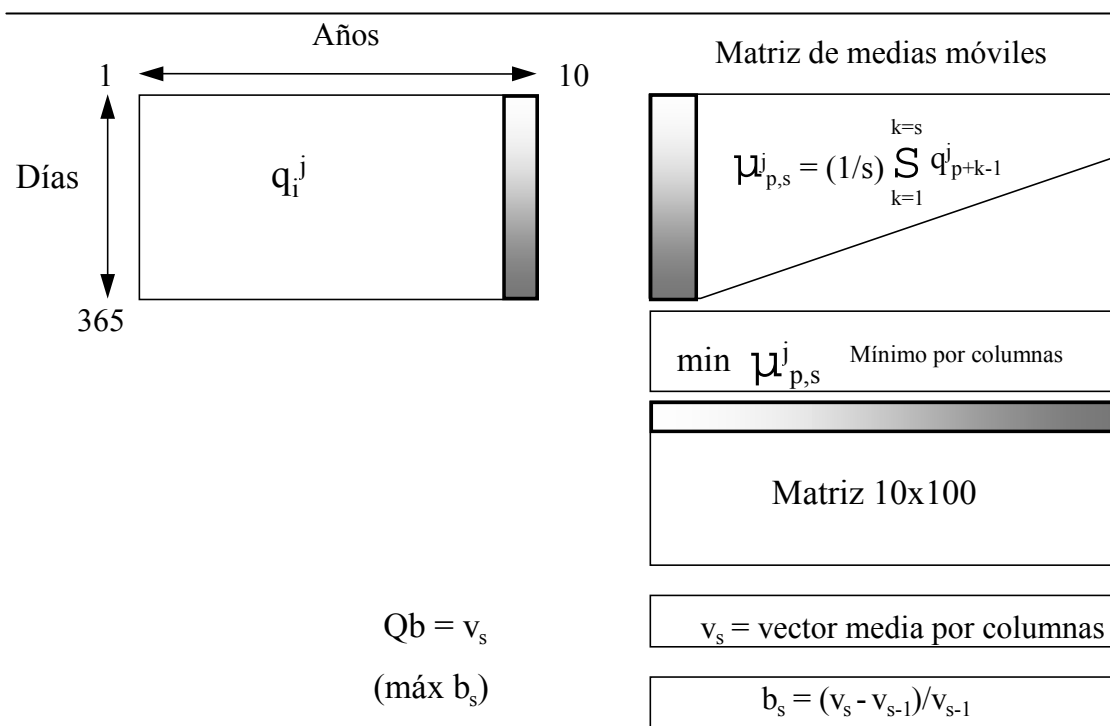


Figura 2.1. Esquema orientativo del proceso de cálculo del caudal básico a partir de una matriz inicial de caudales medios diarios de 10 años.

De cada una de las columnas se obtiene el valor mínimo, que correspondería al mínimo promedio del período de caudales medios diarios de 1, 2, 3, ..., 100 días consecutivos (considerado un intervalo suficiente para contener los máximos períodos de estiaje de los ríos españoles), y que tiende hacia el caudal medio anual (media móvil de orden 365), siendo por tanto siempre menor que él. Esto se repite para cada uno de los años considerados, y se obtiene una matriz de caudales mínimos de 10 x 100 datos.

A partir de la matriz de mínimos, se calculan las medias aritméticas por columnas, obteniéndose una serie de 100 valores (vector  $vs$ ) sobre los que se calcula el mayor incremento relativo entre cada par de valores consecutivos, siendo el  $Q_b$  el caudal mayor que define dicho par de valores (Figura 2.1). El uso de incrementos relativos en vez de incrementos absolutos permite detectar las discontinuidades más significativas, en términos relativos, entre pares de valores consecutivos (caudales mínimos acumulados) y acotar la dispersión del valor de  $Q_b$  alrededor del caudal mínimo absoluto, ya que a caudales mayores, a pesar de que los incrementos absolutos son siempre mayores, los incrementos relativos tienden a disminuir.

### 2.2.2 EL CAUDAL DE ACONDICIONAMIENTO ( $Q_A$ )

En principio el Caudal Básico debe ser suficiente para mantener un nivel de habitabilidad adecuado en el río o tramo de río considerado, pero se puede dar el caso de modificaciones significativas de las características del cauce (dragados, canalizaciones, obras de ribera, etc.), de necesidades de dilución en casos concretos (salinización, contaminación), de razones de conservación de algún componente ambiental muy específico ya sea biótico o abiótico, que tenga un interés especial como puede ser el paisaje, la ribera o cualquier otro elemento, en las que el  $Q_b$  no sea (o no se considere) suficiente para satisfacer tales requerimientos. En estos casos es necesario modificar el  $Q_b$  hasta un valor que permita alcanzar los objetivos preestablecidos, y este caudal adicional es al que se le denomina Caudal de Acondicionamiento. El Caudal de Acondicionamiento se establece, por tanto, como un posible suplemento sobre el Caudal Básico y se calcula a partir de la simulación de secciones representativas del tramo objeto de aprovechamiento, preferentemente las más limitantes, y de la comprobación del cumplimiento de unas condiciones de conservación predefinidas para el valor o componente a proteger.

Para la regulación de cauces naturales no es, en principio, necesario establecer un caudal de acondicionamiento ya que el  $Q_b$  se define precisamente como el adecuado para procurar la conservación de los valores del ecosistema fluvial afectado. No obstante, la enorme variabilidad de circunstancias que pueden confluír en la gestión de un río, hace muy recomendable para el gestor que el método no sea cerrado, sino que el mismo disponga de una herramienta que permita la posibilidad de incorporar decisiones determinadas en circunstancias particulares.

Este Caudal de Acondicionamiento está, por tanto, en sintonía con los planteamientos de los métodos holísticos (por ejemplo el BBM propuesto por King y Louw, 1998) de ir “sumando” caudales en función de requerimientos específicos.

### 2.2.3 EL CAUDAL DE MANTENIMIENTO ( $Q_{MT}$ )

Las comunidades acuáticas presentan una estructura y funcionamiento determinados en función de, entre otros factores, la variabilidad natural en el tiempo, es decir, del régimen de caudales. Por lo tanto, si se quiere mantener el ecosistema fluvial lo más próximo posible a estas condiciones naturales, se debe mantener también la variabilidad temporal en el régimen regulado de caudales propuesto (Bérubé *et al.*, 2002).

Así, el  $Q_b$  (más el caudal de acondicionamiento, si es el caso) no puede ser un caudal fijo a lo largo del año, sino que debe variar siguiendo un patrón similar al régimen de caudales naturales. Esta variación de caudales se consigue a través de la aplicación de un factor de variabilidad temporal al caudal obtenido de la suma del  $Q_b$  y el  $Q_a$ . Este factor de variabilidad temporal es el factor encargado de adecuar el régimen de caudales mínimos a las tendencias de variación del hidrograma natural, y se calcula de forma simple a partir de la relación atenuada entre el caudal medio de cada mes y el caudal medio mensual más bajo. De forma general se aplica a nivel mensual, pero podría establecerse para cualquier otra escala de tiempo. El caudal mínimo para cada mes puede expresarse:

$$Q_{mti} = (Q_b + Q_a) \sqrt{\frac{Q_{mesi}}{Q_{mesmin}}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

donde  $Q_{mti}$  es el caudal mínimo para el mes  $i$ ,  $Q_b$  es el Caudal Básico,  $Q_a$  es el Caudal de Acondicionamiento,  $Q_{mesi}$  es el caudal medio el mes  $i$  para el período de años considerados en la serie de registros escogida, y  $Q_{mesmin}$  es el caudal medio mensual más bajo. La utilización de la raíz cuadrada persigue una atenuación suficiente de los valores extremos del factor de variabilidad temporal, particularmente adecuada en regímenes hidrológicos mediterráneos, sin perjuicio del mantenimiento de las tendencias de variación de la serie de caudales medios mensuales.

Estos caudales mensuales serían los Caudales de Mantenimiento ( $Q_{mt}$ ), donde el mínimo valor correspondería al  $Q_b$  (más el caudal de acondicionamiento si es el caso), y suponen el caudal que como mínimo y de forma normal debe circular por el río en cada periodo de tiempo establecido (meses) siempre que el caudal natural instantáneo en el punto considerado sea igual o superior al caudal de mantenimiento para ese período de tiempo o sea posible suministrarlo a partir de la capacidad de regulación de la obra hidráulica en cuestión. En caso contrario, el caudal de mantenimiento correspondería al caudal natural instantáneo.

En este sentido, más que hablar de un caudal de mantenimiento único y constante para todo el año, hay que hablar de un conjunto de caudales de mantenimiento, lo cual constituye una aportación interesante del método. Con este régimen de caudales se conseguiría una especie de río “a escala hidrológica atenuada” respecto a las condiciones naturales (originales), manteniendo las tendencias naturales de variación temporal para la escala de tiempo considerada (meses, en este caso).

Como se ha mencionado anteriormente, la formulación expresada calcula Caudales de Mantenimiento mensuales, aunque el método admite el cálculo de estos caudales a otra

escala de tiempo (trimestral, quincenal, etc.) según las características de los ríos y las necesidades de gestión.

### 2.2.4 EL CAUDAL GENERADOR

Al igual que existe una variabilidad estacional en el régimen de caudales naturales y ésta debe quedar reflejada en el régimen de caudales de mantenimiento, también es necesaria la existencia de una serie de caudales lo suficientemente elevados para ocupar plenamente el cauce ordinario del río y definirlo (“bankfull”).

Estos caudales son indispensables, entre otras cosas, para conservar la variabilidad hidráulica del río, su composición granulométrica del sustrato y morfología del cauce, para sanear la zona hiporreica del lecho, así como para compensar la presión de colonización de la vegetación de ribera sobre el cauce de aguas bajas. El caudal generador es, por tanto, clave en la conservación de la identidad y la salud del río.

De acuerdo con el concepto teórico, el caudal generador correspondería a la máxima avenida ordinaria, es decir, a la crecida con periodo de retorno de uno a dos años, concretamente alrededor de 1,5-1,6 años según Mosley (1981, citado por Gore y Petts, 1989) o 1,58-2,33 según Richards (1982). Otros autores (Martín Vide, 1997) confirman esta referencia pero apuntan que para el caso de ríos mediterráneos, el periodo de retorno que define al caudal generador varía entre 1,5 y 7 años, con los valores más altos asociados a los ríos más temporales e inestables desde un punto de vista hidrológico. A falta de un estudio que permita validar este punto, se proponen las dos siguientes opciones para el cálculo del caudal generador:

- 1) Aplicando una distribución de Gumbel (Richards, 1982) a los máximos anuales de las series de caudales medios diarios con el período de retorno antes mencionado. Esta distribución de frecuencias de valores máximos responde a la expresión:

$$F(x) = e^{-e^{-y}}$$

siendo “F(x)” la probabilidad de “no excedencia”, es decir, de que en un año no se supere un valor de caudal medio diario “x”, e “y” la variable reducida:

$$y = \frac{(x - u)}{\alpha}$$

donde “α” y “u” son unos parámetros que se obtienen de la serie de datos disponible resolviendo el siguiente sistema de dos ecuaciones:

$$\alpha = \frac{s\sqrt{6}}{\pi} \quad s: \text{desviación típica de } x$$

$$u = \bar{x} - 0.5772\alpha \quad \bar{x}: \text{media de } x$$

El período de retorno queda definido por:

$$\frac{1}{T} = P(x \geq x_T) = 1 - F(x_T)$$

luego

$$F(x_T) = \frac{T-1}{T}$$

El caudal medio diario para un período de retorno T sería:

$$x_T = u + \alpha \left[ -\ln \left[ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right] \right]$$

- 2) Aplicando la definición establecida en el artículo 4º del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, posteriormente modificado por el Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo), donde se indica que “Se considerará como caudal de la máxima crecida ordinaria la media de los máximos caudales anuales, en su régimen natural, producidos durante diez años consecutivos, que sean representativos del comportamiento hidráulico de la corriente”.

El caudal obtenido por cualquiera de las dos opciones habría que multiplicarlo por el cociente  $Q_{mm}/Q_{mn}$  (caudal medio de mantenimiento/caudal medio natural) para adaptarlo a las condiciones de regulación del río en cuestión; es decir mantener la proporcionalidad natural de los caudales generadores respecto a los caudales medios, en las condiciones de regulación de acuerdo con la atenuación de los caudales medios circulantes que supone esa regulación. No hacerlo conduciría a mantener un cauce sobredimensionado en relación al régimen ordinario de caudales de regulación.

En relación a la duración de implementación del caudal generador, existe un buen número de referencias al respecto (Gore y Petts, 1989). Dado que los datos base para el cálculo son caudales medios diarios, y por coherencia con el criterio de definir el caudal generador como la crecida ordinaria para la conservación de la morfología del cauce, se propone que su duración sea por defecto de 24 h (Gore y Petts, 1989).

En cuanto a la frecuencia, se propone su implementación una o dos veces al año. Tanto la frecuencia como la época de aplicación se puede deducir fácilmente del análisis del hidrograma natural del río, planificándose en el número de veces y en las mismas épocas en que se producen crecidas de forma natural (deshielo, lluvias otoñales, etc.), según cada río. En este sentido, el caudal generador se aplicaría dentro del mes donde se registren unos caudales medios mensuales mayores, aunque algunos autores (King y Louw, 1998) proponen su aplicación al principio de la época de máximos caudales para mantener esa información (inicio del periodo de caudales mayores) en el régimen de caudales de mantenimiento.



### 2.2.5 EL CAUDAL MÁXIMO

A pesar de que los principales problemas de los ríos regulados en el Estado Español están relacionados con la escasez de agua que circula por ellos, y la metodología del Caudal Básico va enfocada, en este sentido, a garantizar unos valores mínimos de caudal, no hay que olvidar que un exceso de caudal también puede modificar la estructura y el funcionamiento de la comunidad biológica del sistema fluvial, además de sus características geomorfológicas.

Este sería el caso de los trasvases o sueltas periódicas (de baja frecuencia) desde grandes embalses de regulación (de embalses hiperanuales), que pueden originar, de forma excepcional, crecidas en los ríos afectados superiores a las que se darían de forma natural en los mismos.

Se puede concluir que dentro de la gestión completa de un río regulado, hay que definir también tanto un caudal máximo absoluto como un régimen de caudales máximos que pretenda limitar la posibilidad de modificaciones en las características geomorfológicas del cauce, para no modificar la estructura morfológica del sistema fluvial (río y riberas) y de sus comunidades naturales.

El caudal máximo que propone la metodología para las condiciones de regulación es el caudal calculado para un período de retorno de 25 años, considerado como el umbral a partir del cual caudales superiores pueden producir cambios morfológicos fundamentales en el cauce (Richards, 1982), cambiando por lo tanto la estructura e identidad del mismo.

Este caudal no se podría soltar todos los meses o todos los años sino que, debido a su propia definición, sólo se admitiría su implementación artificial una vez cada 25 años. Evidentemente esta limitación sólo se refiere a la gestión ordinaria de los ríos regulados y no a las situaciones de crecida o de riesgo en general, en cuyo caso, lógicamente, pueden prevalecer otros criterios de actuación.

En cuanto al régimen de caudales máximos, éste debe ser tal que garantice que un determinado caudal alto no sobrepasa el porcentaje de días en los que ese mismo caudal elevado circularía de forma natural por el río. La forma más sencilla de establecer la relación entre caudales máximos y tiempo de circulación es a partir de una simple distribución de frecuencias, estableciendo un número determinado de clases o intervalos de caudales en función de la amplitud de variación (máximo-mínimo) de la serie considerada.

Como ocurría con el caudal generador, aunque en este caso de forma opcional (a estudiar según las circunstancias), puede ser conveniente atenuar proporcionalmente los caudales máximos naturales hasta unos caudales máximos admisibles en condiciones de regulación, utilizando por ejemplo el mismo factor de corrección (cociente  $Q_{mm}/Q_{mn}$ ).

### 2.2.6 TASA DE CAMBIO DE CAUDAL EN LA UNIDAD DE TIEMPO

Los cambios bruscos de caudal, como los que acompañan a determinados tipos de aprovechamientos hidráulicos, pueden ser más limitantes para las comunidades

acuáticas aguas abajo de los mismos que incluso unos Caudales de Mantenimiento inadecuados. A pesar de que existen algunos casos en los que se ha observado que variaciones bruscas de caudal pueden favorecer el desarrollo de algunas especies (al no verse tan afectadas como otras y sufrir un mayor desarrollo posterior a la alteración), especialmente las del orden *Chironomidae*, que toleran bien dichas fluctuaciones, o de otros órdenes como *Paraleptophlebia* que se entierran y son capaces de sobrevivir ante condiciones adversas, existen numerosas referencias en la bibliografía que muestran cómo dichas variaciones de caudal son perjudiciales para los ecosistemas acuáticos (Cushman, 1985; Bain *et al.*, 1988; Crisp, 1989; Camargo y García de Jalón, 1990). Así, se ha encontrado tras un régimen de variaciones bruscas de caudal una reducción de la productividad del río, entendida no sólo como reducción en la producción de peces, sino también como reducción en densidad, biomasa y diversidad de plantas acuáticas y organismos bentónicos de los que depende la población de peces, así como de la fauna que depende de la productividad del río para su alimento y refugio (Cushman, 1985).

Se hace recomendable, pues, establecer unas tasas de cambio de caudal por unidad de tiempo que sean compatibles con la capacidad de amortiguación del cauce y, en definitiva, con la capacidad de respuesta de las comunidades naturales.

La Tasa máxima de Cambio de Caudal por Unidad de Tiempo se calcula en primera aproximación a partir de una función exponencial sencilla aplicada a las máximas diferencias de caudal entre dos valores sucesivos de caudales medios diarios (tomando los logaritmos de dichos caudales) del régimen natural de caudales del río:

$$Q_t = Q_0 \times K^t \quad \left[ (\log Q_t - \log Q_0) / t = \log K \right] \quad \text{Ecuación 2.2}$$

donde “ $Q_0$ ” es el caudal inicial (menor), “ $Q_t$ ” el caudal final (mayor) y “ $K$ ” la constante de variación para un determinado incremento de tiempo “ $t$ ” (= 24 horas, por definición), calculada como el máximo valor de  $(\log Q_t - \log Q_0)$ . De esta forma se calcula una  $K$  tanto para la fase de incremento de caudales (ascenso) como para la de descenso. Algunas aspectos importantes a destacar en relación con esa tasa máxima de cambio de caudal por unidad de tiempo (en adelante  $K$ ) son:

- Al ser los caudales medios diarios los datos sobre los que normalmente se trabaja por no estar siempre disponibles, salvo en las estaciones de aforo automáticas, los datos de caudales instantáneos, el valor obtenido para la  $K$  es un valor muy atenuado respecto a la realidad (con caudales instantáneos darían valores más extremos).
- Tal y como se ha calculado es un valor de cambio referido a una hora, periodo excesivamente dilatado en la práctica para generar incrementos de caudal a una escala de tiempo razonable, desde un punto de vista operativo para la mayoría de aprovechamientos hidráulicos.
- Representa un valor medio para el intervalo de caudales sobre el que se ha calculado, cuando en realidad no es un valor constante sino que varía a lo largo del hidrograma.

De todo ello debe concluirse que la  $K$  así calculada es un valor orientativo susceptible de adaptación a la realidad técnica (infraestructura de regulación) y, por supuesto biológica (ecosistema fluvial) donde va a aplicarse.

### **2.2.7 CALIDAD DEL AGUA SUMINISTRADA**

Al igual que en el caso de las fluctuaciones de nivel, de nada sirve un Régimen de Caudal de Mantenimiento adecuado si la calidad de las aguas no es suficiente (Palmer *et al.*, 2002), como puede ser el caso aguas abajo de un embalse eutrófico con desagües de fondo o en tramos de ríos por pérdida de capacidad de dilución en el tramo regulado.

La calidad mínima exigible para el agua por debajo de un aprovechamiento hidráulico, se define a partir del estudio de una serie de indicadores físico-químicos y biológicos, de cuya interpretación se concluye la necesidad o no de llevar a cabo medidas de acondicionamiento sobre el flujo de agua.

### **2.2.8 EL REGIMEN DE CAUDALES DE MANTENIMIENTO**

Como ya se ha apuntado anteriormente, cada uno de estos conceptos cubre un aspecto importante en la gestión de ríos regulados, y el conjunto de todos ellos constituye el Régimen de Caudales de Mantenimiento. Este régimen está caracterizado en primer lugar por un caudal mínimo para cada mes (correspondería al  $Q_m$ ), cuyo mínimo absoluto vendría dado por la suma del  $Q_b$  y el  $Q_a$  (si procede), y el cual sigue la tendencia temporal del hidrograma natural del río. Además, existiría un caudal generador producido de forma anual, cuya magnitud se calcula como se ha indicado anteriormente, y cuya localización en el tiempo y frecuencia deben estar determinados por los gestores del río en función de las características del régimen de caudales naturales e hidrograma. Así, en ríos con un marcado carácter pluvial, sólo existirá un pico en el hidrograma correspondiente a la época de grandes lluvias, y por lo tanto en el Régimen de Caudales de Mantenimiento sólo aparecerá el Caudal Generador en esa época. Por el contrario, si el río sigue un régimen nivo-pluvial (con dos picos de máximos en el hidrograma), el Caudal Generador puede y debe producirse dos veces a lo largo del año coincidiendo con los períodos de máximos caudales por lluvias y por deshielo.

El Régimen de Caudales de Mantenimiento también incluirá un Caudal Máximo como se ha explicado anteriormente, cuya frecuencia no debe superar la del período de tiempo base para su cálculo (período de retorno). Tanto el Caudal Generador como el Caudal Máximo no podrán soltarse de forma brusca, sino de forma paulatina según la tasa de cambio de caudal en la unidad de tiempo. Un ejemplo del resultado de la aplicación del Régimen de Caudales de Mantenimiento a un río aparece en la figura 2.2, donde además de los parámetros de caudales mensuales que aparecen habría que añadir un caudal máximo permitido, unos valores mínimos de calidad del agua y unos valores de la tasa de cambio de caudal en la unidad de tiempo.

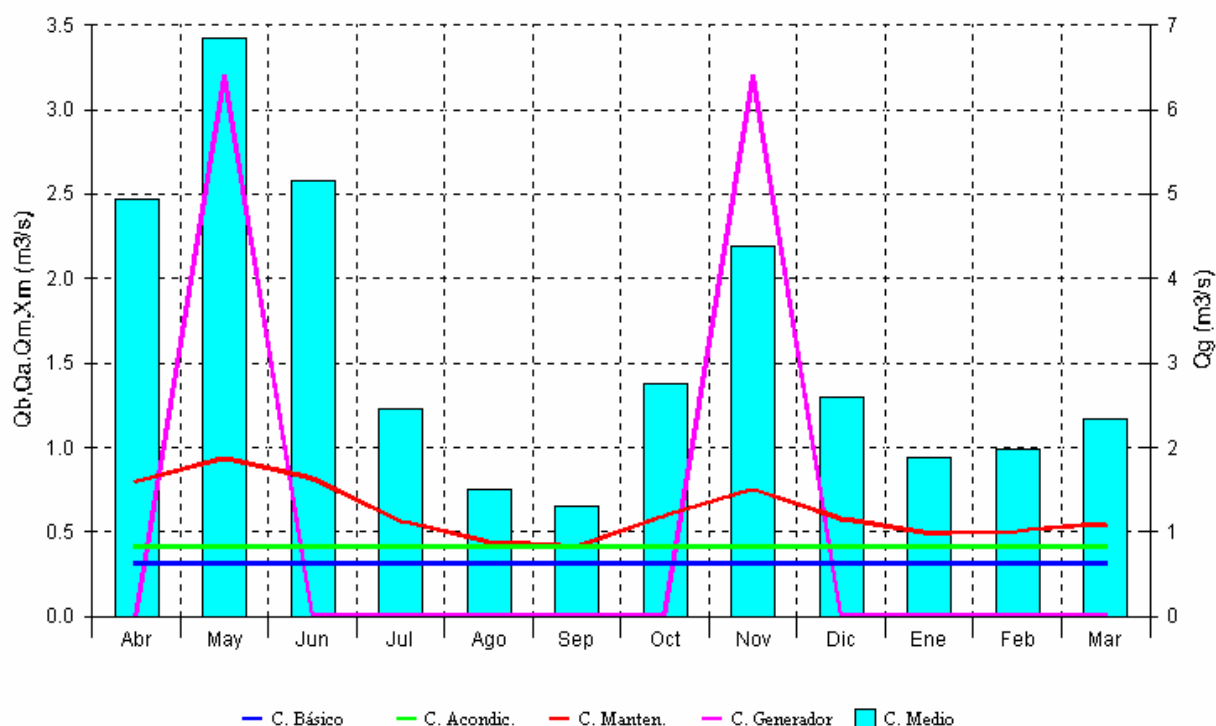


Figura 2.2. Ejemplo de aplicación del Régimen de Caudales de Mantenimiento.

### **2.3 VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL MÉTODO**

El método del Caudal Básico se calcula en cuestión de minutos (está informatizado) sobre la base del régimen hidrológico natural de cada tramo de río (está personalizado para cada caso en cuestión), no admite arbitrariedades en la interpretación de los resultados (es objetivo) y no supone un único valor de caudal mínimo sino un verdadero régimen de gestión temporal del tramo de río objeto de regulación.

Es una metodología abierta y versátil, como lo demuestra la existencia del concepto de Caudal de Acondicionamiento, que hace que sea aplicable en todo tipo de situaciones, incluso en tramos modificados artificialmente. Por otro lado, es una metodología dinámica donde el procedimiento de cálculo de distintos conceptos, como el Caudal Generador o el Caudal Máximo, puede ir variando según las características y naturaleza de la zona a aplicar y a medida que aumentan los conocimientos hidrológicos del medio sin variar la esencia del método.

Como limitaciones de esta metodología cabe citar su gran dependencia de la existencia y fiabilidad de registros de caudales medios diarios, datos que en muchas ocasiones no están disponibles o presentan deficiencias en cuanto a errores puntuales o discontinuidades. No en vano, el fundamento del método parte del principio de que el régimen hidrológico del río es su código genético, y por tanto no puede estar alterado si se quiere extraer información precisa de él.

Además, existe la ya mencionada crítica recibida por otros métodos hidráulicos e hidrológicos (ver capítulo 1.2) en cuanto a la falta de relación contrastada entre el régimen de caudales naturales y la ictiofauna, vegetación de ribera y otros elementos del ecosistema fluvial, y por lo tanto falta de seguridad en la validez del régimen de caudales ambientales propuesto y el mantenimiento de la integridad funcional del río (Martínez Santa-María, 2003; Martínez Santa-maría y Fernández Yuste, 2006). No obstante, en Noviembre de 2002 se finalizó un trabajo abordado por el CEDEX conjuntamente con la Universidad de Lleida para la validación práctica de este método en ríos del norte de la provincia de Lleida (Cachón, 2003) donde se puso de manifiesto que con la propuesta de régimen de caudales de mantenimiento *“en ausencia de otros factores condicionantes distintos a la variación de caudal, se conservan unas condiciones por lo menos aceptables, de calidad de agua y de habitabilidad para el fitobentos algal, los macroinvertebrados bentónicos y los peces, entendiéndose por condiciones aceptables, unas claramente alejadas de las asociadas a limitación por caudales insuficientes, con referentes en términos de biomasa y densidad que caen dentro de sus respectivos intervalos de variación ordinarios, en condiciones naturales”*, lo que demuestra la bondad del método e incentiva a su aplicación y puesta en práctica.

## **Capítulo 3. Material y métodos**

### **3.1 Análisis del Método del Caudal Básico**

3.1.1 Análisis de la serie de datos de partida

3.1.2 El año hidrobiológico

3.1.3 Número de años considerados para el cálculo de  $Q_b$  y su validez temporal

3.1.4 Proceso de cálculo del  $Q_b$

3.1.5 Tasa de cambio de caudal en el tiempo

3.1.6 El caudal de mantenimiento

3.1.7 Significación hidrológica del  $Q_b$

3.1.8 Condiciones hidráulicas generadas por el  $Q_b$

### **3.2 Aplicación del Método del $Q_b$ a la Cuenca Hidrográfica del Ebro**

3.2.1 Fuentes de información y selección de estaciones de aforo

3.2.2 Selección de variables

3.2.3 Análisis de datos

### **3.3 Aplicación de redes neuronales artificiales (RNA) a la determinación de $Q_b$**

3.3.1 Introducción

3.3.2 Área de estudio, naturaleza y características de las variables

3.3.3 Arquitectura de las redes neuronales

### **3.1 ANÁLISIS DEL MÉTODO DEL CAUDAL BÁSICO**

En este apartado se pretende evaluar, ajustar y desarrollar algunos aspectos del método del Caudal Básico. Para ello, se ha partido de una base de datos compuesta por los caudales medios diarios proporcionados por 43 estaciones de aforo, 27 de ellas pertenecientes a ríos de la Cuenca Hidrográfica del Ebro y 16 a ríos de las Cuencas Internas de Cataluña. De esta forma se obtiene una amplia gama de diferentes tipologías de ríos analizando el comportamiento de la metodología en el mayor número de situaciones posibles.

Los criterios para la selección de cada uno de estos puntos se basaron en el cumplimiento de las siguientes condiciones:

- 1) Que estén sometidos a un régimen natural de caudales, no afectado (al menos de forma significativa) por usos consuntivos o de regulación (captaciones de agua, embalses) o por cualquier otra actividad humana que modifique las condiciones naturales del río (obras hidráulicas, infraestructuras, usos y aprovechamientos de ribera, vertidos, etc.). Esta condición es difícil de cumplir en muchos ríos de las Cuencas Internas de Cataluña ya que pasan por zonas muy antropizadas donde es muy frecuente la existencia de cauces modificados o vertidos incontrolados. En este sentido, aunque algunos de los ríos escogidos no cumplan estrictamente este requisito, se han incluido en el estudio ya que representan una tipología de río muy mediterránea, frecuente en toda la vertiente oriental peninsular, con unas características de variabilidad y temporalidad muy particulares y a la vez muy distintas a la mayoría de los ríos de la Cuenca del Ebro. Los datos de caudales utilizados para estos ríos y los resultados obtenidos hay que tomarlos por tanto, como un ejercicio de cálculo para evaluar la metodología propuesta desde un punto de vista hidrológico.
- 2) Que dispongan de una estación de aforo próxima y representativa para calcular el  $Q_b$ . Estas estaciones de aforo deben llevar en funcionamiento al menos diez años, de manera que se puede disponer de series completas de registros de caudales circulantes medios diarios sin necesidad de tener que reconstruir o completar las series de caudales naturales.
- 3) Que sean representativos del mayor número posible de ríos (régimenes de caudales, tipos de cauce, etc.).

Debido a estas exigencias, los tramos finalmente seleccionados están en su mayoría localizados en las cabeceras de los ríos y partes medias. Este hecho responde lógicamente a que los tramos medios y altos son los que se encuentran en un mejor estado de conservación natural, además de ser precisamente donde actualmente también se concentra la mayor presión potencial de aprovechamientos hidráulicos afectables por la implementación de caudales de mantenimiento.

En la tabla 3.1 se muestra la relación de puntos seleccionados, así como su posición geográfica, altitud, área de la cuenca vertiente tanto de la estación de aforo como la total del río, número de años con serie de caudales medios diarios completa estudiados y período de tiempo en el que están comprendidos los años estudiados.

A continuación se exponen los aspectos metodológicos particulares de cada análisis o estudio realizado. En Palau *et al.* (1997) se pueden consultar más detalles sobre algunas de las metodologías utilizadas.

Tabla 3.1. Características generales y localización de los puntos de aforo seleccionados para la propuesta de descriptores de clasificación de cuencas y para la validación hidrológica del Qb. (EA: Estación de Aforo; E: Estaciones de aforo de la Cuenca del Ebro; P: Estaciones de aforo de las Cuencas Internas de Cataluña; A, B: fuera de la red oficial de aforos).

Nº EA	Río	POBLACIÓN	ALT. (m)	SUP. CUENCA (km <sup>2</sup> )		COORDENADAS GEOGRÁFICAS		Nº AÑOS	PERÍODO
				EA	Total	Latitud	Longitud		
3E	Ega	Andosilla	300	1445	1461	42-22-30N	1-56-56O	10	1980-90
4E	Arga	Peralta	485	2704	2759	42-20-20N	1-47-26O	10	1980-90
8E	Piedra	Nuevalos	414	732	1544	41-12-03N	1-47-27O	10	1980-90
10E	Jiloca	Daroca	750	2202	2597	41-06-10N	1-24-56O	10	1980-90
20E	Carol	Puigcerda	1170	145	157	42-26-54N	1-54-40E	28	1961-92
23E	Segre (1)	Seo de Urgel	670	1233	22579	42-21-10N	1-27-34E	10	1971-92
35E	Iregua	Villoslada	990	285	692	42-07-36N	2-39-14O	10	1980-90
44E	Cidacos	Yanguas	940	223	692	42-06-20N	2-19-56O	10	1980-90
57E	Deza	Embid Ariza	782	207	253	41-23-10N	1-59-16O	10	1980-90
64E	Salazar	Aspurz	547	396	533	42-42-50N	1-09-36O	10	1980-90
74E	Zadorra	Arce	450	1357	1358	42-40-40N	2-53-46O	10	1980-90
79E	Erro	Urroz-Villa	483	180	214	42-46-20N	1-27-16O	10	1980-90
83E	Segre (2)	Oliana	440	2700	22579	42-05-20N	1-17-34E	10	1976-87
90E	Bco. del Val	Los Fayos	570	145	145	41-52-40N	1-47-06O	10	1980-90
91E	Alcanadre	Lascellas	390	501	3385	42-05-20N	0-06-36O	10	1980-90
100E	Guadalopillo	Berge	700	141	386	40-51-30N	0-25-26O	10	1980-90
122E	Aguas Vivas	Blesa	760	138	1330	41-14-00N	0-52-56O	10	1980-90
131E	Noguera Tor	Llesp	924	225	240	42-27-10N	0-45-24E	10	1984-93
135E	Tor	Alins	1059	60	60	42-33-9N	1-19-60E	24	1965-92
136E	Baliera	Noales	995	76	104	42-27-36N	0-39-37E	25	1965-91
142E	Lumbreras	Lumbreras	1080	113	127	42-06-00N	2-37-26O	10	1980-90
148E	Sallent	Coll Nargo	530	69	70	42-9-54N	1-18-10E	22	1961-92
151E	Ubagua	Muez	470	55	75	42-45-10N	1-56-26O	10	1980-90
171E	Cinqueta	Molino Gistain	1210	100	425	42-36-46N	0-20-50E	26	1965-91
198E	Vallferrera	Alins	1080	83	412	43-33-20N	1-19-55E	24	1965-92
A	N. Ribagorzana	Baserca	1440	78	2046	42-35-47N	0-45-48E	11	1985-96
B	Sta. Magdalena	Montenartrò	1291	97	109	42-26-51N	1-19-05E	10	1983-92
4P	Anoia	St.Sadurní d'Anoia	121	726	929	41-26-41N	1-47-21E	10	1976-86
6P	Gaià	Querol	450	123	424	42-7-19N	1-21-13E	10	1976-86
16P	Fluvià	Esponellà	99	804	1125	42-10-38N	2-48-01E	10	1976-86
20P	Onyar	Girona	70	295	341	41-58-35N	2-49-30E	11	1976-87
28P	Francolí	Montblanc	310	338	838	41-21-59N	1-10-49E	11	1976-87
39P	Riera Mediona	St.Quintí Mediona	375	65	92	41-27-36N	1-40-02E	11	1976-87
40P	Ser	Serinyà	140	113	124	42-10-19N	2-43-37E	11	1976-87
45P	Riera Caldes	La Florida	56	110	112	41-31-25N	2-11-57E	11	1976-87
46P	Riera de Tenes	Parets del Vallés	75	152	154	41-35-14N	2-14-50E	11	1976-87
56P	Riera Arbúcies	Hostalric	119	110	116	41-45-40N	2-36-02E	10	1976-87
58P	Brugent	La Riba	232	69	69	41-19-16N	1-10-36E	10	1976-86
62P	Tordera	Tordera Can Serra	35	802	894	41-43-03N	2-42-35E	11	1976-87
64P	Ridaura	Sta. Cristina d'Aro	25	55	73.8	41-49-11N	2-58-48E	11	1976-87
65P	Riera Carme	Pobla Claramunt	285	100	104	41-32-42N	1-39-49E	11	1976-87
76P	Riera Rubí	El Papiol	35	122	122	41-26-11N	1-59-51E	11	1976-87
86P	Llobregat	Pobla de Lillet	929	23	4948	42-15-41N	1-58-45E	9	1979-90



### **3.1.1 ANÁLISIS DE LA SERIE DE DATOS DE PARTIDA**

El análisis de la serie de datos de partida se abordó a través de la reflexión sobre la forma de operar del método, identificando posibles fuentes de error en los datos de partida, como son discontinuidades en las series de datos y errores en la toma y transcripción de los mismos. Así mismo se plantearon posibles soluciones a esos problemas, siempre siendo conscientes de que esas soluciones son particulares para una correcta aplicación del método del Caudal Básico pero pueden no serlo para la utilización de esas mismas series de datos corregidas con otro fin.

### **3.1.2 EL AÑO HIDROBIOLÓGICO**

Uno de los aspectos que da validez y credibilidad a una metodología es que su aplicación sobre una misma base de datos siempre de idénticos resultados. En este sentido, se escogió una submuestra de ríos que representan distintos regímenes hidrológicos (un total de 11 ríos incluyendo ríos con gran variabilidad de caudales, ríos con poca variabilidad de caudales, ríos que presentan el máximo de caudales en invierno y ríos que presentan los caudales máximos en primavera) sobre la que se estudió la variabilidad de resultados obtenidos al alterar el mes de inicio de los años en la serie de datos. Para ello, sobre la base de datos original se crearon otras 12 bases de datos transformadas en las que los años empiezan a contar desde un mes diferente, y sobre estas bases de datos se aplicó el método del Caudal Básico. De la comparación de resultados se analizó la posible variación de los mismos, así como su naturaleza, es decir, cual es el paso del proceso de cálculo en el que se produce esa alteración de resultados y por qué. Por último, se planteó una solución para resolver las posibles variaciones en los resultados obtenidos a través de la mejor definición del método introduciendo unos criterios para definir en cada caso cual es la fecha de inicio de los años de series de datos. En la figura 3.1 se puede ver un esquema de la metodología de trabajo.

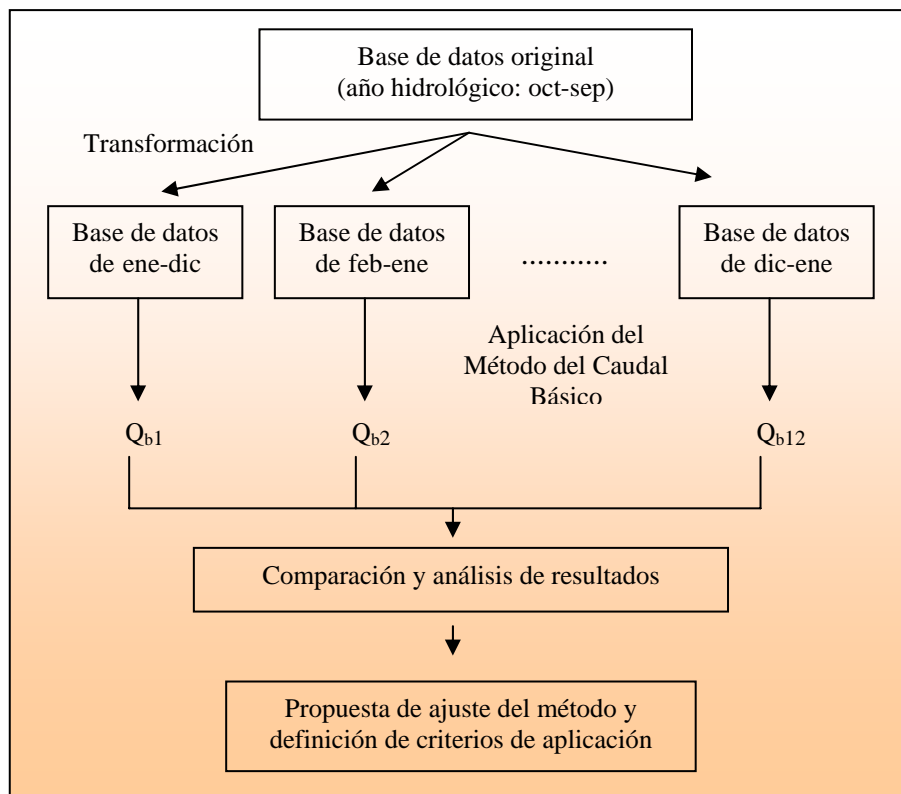


Figura 3.1. Esquema metodológico del estudio para la definición del año hidrobiológico.

### 3.1.3 NÚMERO DE AÑOS CONSIDERADOS PARA EL CÁLCULO DE $Q_B$ Y SU VALIDEZ TEMPORAL

De la misma forma que en el apartado anterior, el valor del  $Q_b$  obtenido varía en función de la amplitud de la base de datos de partida, es decir, del número de años que se consideran para su cálculo. Así, sobre los datos proporcionados por las 43 estaciones de aforo se calcularon los  $Q_b$  para los periodos de tiempo acumulados de 1, 2, .... n últimos años representando gráficamente los resultados. Del análisis visual de la variación del valor del  $Q_b$  en función del periodo de años considerado se puede determinar cuándo se estabiliza dicho valor, es decir, a partir de qué tamaño del periodo considerado el aumentar el número de años no influye significativamente en el valor del  $Q_b$ , así como las diferentes tipologías de ríos en cuanto a su comportamiento respecto a este aspecto. De esta forma se profundizó en la definición del método al establecer unos criterios para determinar el periodo de años a considerar en el cálculo del  $Q_b$ , así como la validez temporal de la aplicación de los resultados obtenidos, es decir, el periodo de tiempo durante el cual es válida la aplicación de los  $Q_b$  obtenidos y cuándo se recomienda que se recalculen los mismos con las series de datos actualizadas.

### 3.1.4 PROCESO DE CÁLCULO DEL CAUDAL BÁSICO

Dentro del propio proceso de cálculo del  $Q_b$  se incluyen una serie de decisiones y procedimientos que en un principio pueden ser considerados como arbitrarios y que se pretenden analizar y justificar. Para ello se analizaron los resultados de la utilización de la media aritmética en el cálculo de medias móviles frente al uso de otros descriptores del valor central y representativos de un conjunto de datos, tanto a nivel conceptual (para descartar los descriptores que no cumplan las bases conceptuales de la metodología o no sean válidos de acuerdo a la naturaleza de los datos) como a nivel de resultados.

Por otro lado, se justificó el uso de incrementos relativos frente a incrementos absolutos en el cálculo de  $Q_b$  así como el número de orden de las medias móviles para la obtención de unos valores acordes con el objetivo final de la metodología (determinación de unos caudales *mínimos* admisibles) y para facilitar y agilizar el proceso de cálculo.

Por último, se analizó una alternativa de cálculo propuesta por el propio autor del método consistente en calcular un  $Q_b$  para cada año y promediar los valores frente al cálculo de un  $Q_b$  para unas condiciones medias como se hace en la propuesta original. Los resultados obtenidos por ambas alternativas se analizaron mediante técnicas de estadística descriptiva (como por ejemplo análisis de residuos) y estudios de regresión en lugar de utilizar otro test que *a priori* podría parecer más indicado como podría ser el de la  $t$  de *student* para datos pareados, ya que al buscarse una población de datos lo más diversa posible (hay unos ríos con caudales medios grandes y otros con caudales muy pequeños), las posibles diferencias entre los resultados obtenidos por las dos alternativas podrían quedar enmascarados con las grandes diferencias existentes entre los valores para unos ríos y otros. Además, los resultados obtenidos por ambas alternativas se compararon con el régimen hidrológico de los ríos para ver cual se ajusta más a sus características.

### 3.1.5 TASA DE CAMBIO DE CAUDAL EN EL TIEMPO

La tasa de cambio de caudal en el tiempo calculada por la metodología del Caudal Básico es una tasa máxima y orientativa, por lo que hay que definirla en mayor profundidad. Así, se concretaron en mayor medida la duración y características tanto de la curva de incrementos de caudal como la de descenso indicando en cada caso los criterios y recomendaciones que se deben seguir para su aplicación.

### 3.1.6 EL CAUDAL DE MANTENIMIENTO

El objetivo del Caudal de Mantenimiento es proporcionar al Caudal Básico una variabilidad temporal similar a la del régimen natural de caudales. Esto se consigue mediante la aplicación al  $Q_b$  de un factor de corrección sencillo (ecuación 2.2). Para comprobar el correcto ajuste del régimen de caudales regulados a la variabilidad natural, se compararon los resultados obtenidos de la aplicación del Caudal de Mantenimiento con los resultados obtenidos de realizar un análisis de series temporales a las series de caudales naturales de los 43 ríos estudiados. Para realizar este análisis de series

temporales se utilizó un programa informático desarrollado por el Departamento de Estadística e Investigación Operativa de la E.T.S. de Ingenieros Industriales de la U.P.C. (Barcelona) basado en la metodología Box-Jenkins y la descomposición armónica (Box *et al.*, 1994; Pankratz, 1983). Para ello, se separó la componente *tendencia* (variable que refleja los movimientos de las series temporales a largo plazo, superior al periodo base de la información, que en nuestro caso es el año) de la componente estacional, que es la que recoge las oscilaciones inferiores al año, de carácter periódico regular con amplitud submúltiplo del año y que generalmente oscilan alrededor de la tendencia (Serret, 1998). Esta componente estacional correspondería a la variabilidad intraanual que aplicada al Qb debería dar el régimen de caudales de mantenimiento.

### 3.1.7 SIGNIFICACIÓN HIDROLÓGICA DEL CAUDAL BÁSICO

El análisis del significado hidrológico del Caudal Básico se aborda desde dos puntos de vista:

- Primero, se analizaron las condiciones de caudal que supone la aplicación de los Qb a los 43 ríos estudiados viendo el porcentaje que representan respecto a los caudales medios, y comparando los Qb obtenidos con los caudales que circulan por los cauces en condiciones naturales. Para ello se relacionaron con los intervalos de caudales más frecuentes (calculados en base a intervalos equivalentes al 20% del caudal medio, ya que ese es aproximadamente el porcentaje medio que representa el Qb respecto al caudal medio en el conjunto de ríos analizados; este valor es similar al aproximadamente 22% obtenido por la Agencia Catalana del Agua al aplicar el Qb a las cuencas internas de Cataluña) y se determinó a qué caudal clasificado corresponden (caudales igualados o superados durante un determinado número de días). De esta forma se pudo establecer si los caudales regulados propuestos suponen unas condiciones de caudales mínimos no usuales en los ríos que pudieran llevar a una transformación radical del ecosistema acuático.
- Segundo, se buscaron relaciones del Qb con distintos parámetros hidráulicos para explicar su posible significado hidrológico en función de las características del régimen de caudales naturales. Para ello, primero se hizo una lista de posibles parámetros que definen y caracterizan el régimen hidrológico de los ríos (caudal medio interanual, coeficiente de variación, desviación estándar, caudal mínimo, caudal máximo, caudales clasificados, caudales más frecuentes,...), para después buscar relaciones de correlación simples con el Qb. No se realizaron en este punto estudios más profundos dada la heterogeneidad ya mencionada y búsqueda de la muestra, la cual condicionó en gran medida los resultados (bajos coeficientes de correlación pueden ser debidos tanto a una baja correlación real entre las variables como a la heterogeneidad de la muestra y a la variabilidad de posibles relaciones entre los parámetros considerados). En apartados posteriores (apartado 3.2.3) se realiza una clasificación de las estaciones de aforo de la Cuenca del Ebro en grupos hidrológicamente homogéneos, en los cuales sí se pueden establecer mejor dichas relaciones.

### 3.1.8 CONDICIONES HIDRÁULICAS GENERADAS POR EL CAUDAL BÁSICO

#### Selección de los puntos de muestreo

Para el estudio de las condiciones hidráulicas generadas por el Caudal Básico se tomó una submuestra de entre las 43 estaciones de aforo objeto de estudio que cumpliera una serie de condiciones añadidas a las comunes al resto de los tramos estudiados, pero más estrictas. Estas condiciones se pueden sintetizar en:

- 1) Encontrarse en un buen estado de conservación (ribera, lecho, etc.), lo más natural posible, tanto en relación con los caudales circulantes, como con las actividades existentes en su cuenca (vertidos, etc.).
- 2) Pertener a una tipología de tramo de río que es particularmente sensible, y a la vez frecuentemente susceptible, a alteraciones de su régimen natural de caudales por aprovechamientos hidráulicos. Se trata de tramos altos de ríos con secciones muy condicionadas por el régimen de caudales en cuanto a forma y granulometría del lecho y ribera.
- 3) Ser tramos de río sobre los que en mayor o menor grado, se dispone de una cierta información sobre sus principales características limnológicas.
- 4) Permitir la suficiente accesibilidad y posibilidades de medición, de acuerdo con los objetivos del estudio (establecer secciones de control donde hacer las mediciones, incluyendo pesca eléctrica, si es el caso).

Todos estos condicionantes se conseguían en los tramos superiores de ríos de la cuenca del Segre, uno de los afluentes más importantes del Ebro, que presenta en general aguas poco mineralizadas, rápidas, frías y bien oxigenadas, con unos regímenes de caudales aún en algunos tramos muy poco o nada alterados, y también con un grado de afección por actividades humanas (vertidos, alteraciones del cauce y riberas, etc.) relativamente bajo (Palau *et al.*, 1997), en todo caso adecuado para los objetivos del estudio hidráulico.

Así, se seleccionaron en la zona de cabecera de la cuenca del río Segre un total de 7 tramos de unos 30 m de longitud, la cual se ha considerado suficiente para su caracterización hidráulica en relación al hábitat físico para peces (Binns y Eiserman, 1979; Bowlby y Roff, 1986). Las características generales de estos tramos son:

- Río Cinqueta (estación de aforo 171). Tramo de notable alternancia entre aguas muy rápidas, someras y profundas pozas en remansos. Granulometría gruesa dominante con caudales de estiaje notables, lo que hace que sea un cauce de vadeo complicado. La ribera es estable y tiene una vegetación bien estratificada, con un grado de cobertura alto y de sombra proyectada sobre el cauce.
- Río Baliera (estación de aforo 136). Tramo estrictamente reófilo de granulometría entre gruesa y media (bloques y cantos), pero de distribución uniforme. Caudales de estiaje notables. En la vegetación de ribera domina el estrato arbustivo con una cobertura media.

- Río Noguera Ribagorzana (estación de aforo de ENDESA en el embalse de Baserca). Tramo bastante heterogéneo a nivel granulométrico y también morfológico, con una amplia variabilidad hidráulica y unos caudales de estiaje moderados. La ribera presenta un grado de cobertura media con el estrato arbustivo como dominante.
- Río Tor (estación de aforo 135). Tramo de río secundario. Granulometría dominante entre fina y moderada (gravas y cantos). El caudal de estiaje es moderado. La vegetación de ribera está dominada por los estratos arbóreo y arbustivo, con un grado de cobertura medio y un nivel de sombreado sobre el cauce bajo.
- Río Vallferrera (estación de aforo 198). Tramo típico en galería. Granulometría dominante media (cantos) y bastante homogénea. Caudal de estiaje también moderado. La vegetación de ribera presenta los tres estratos (arbóreo, arbustivo y herbáceo), bien consolidados, con una alta cobertura y un notable sombreado del cauce.
- Río Carol (estación de aforo 20). Tramo secundario típico en galería, algo limnófilo, de granulometría variada y con un caudal de estiaje bajo. La ribera presenta los tres estratos de vegetación (arbóreo, arbustivo y herbáceo) con una alta cobertura y sombreado del cauce.
- Río Sallent (estación de aforo 148). Tramo con 2 subzonas, una de granulometría media y fina (cantos y gravas), homogénea; la otra de carácter algo más reófilo, con granulometría de mayor tamaño medio y más variada. Caudales de estiaje muy reducidos. En ambas subzonas la ribera presenta los tres estratos de vegetación (arbóreo, arbustivo y herbáceo) con un grado medio de cobertura y notable sombreado del cauce.

De cada uno de estos tramos seleccionados se consiguieron los registros de aforos de la estación correspondiente más próxima y se procedió a la realización de una serie de mediciones de descriptores hidráulicos, en forma de transectos transversales al cauce, tal y como se indica más adelante. Igualmente se llevaron a cabo una serie de determinaciones de tipo limnológico para su caracterización general.

#### Toma de datos, determinaciones y mediciones

La época de muestreo seleccionada para la realización de los trabajos de campo (caracterización físico-química y biológica, ambas de forma general, e hidráulica), fue la estival (Julio y Septiembre de 1997) fundamentalmente debido a que se trata del momento del año en el que los caudales circulantes están más próximos a los mínimos ambientales deseables, de modo que para la simulación de unas posibles condiciones de regulación, las características medidas en tales condiciones, a todos los niveles (hidráulico, limnológico, etc.) no están demasiado alejadas de las simuladas y por tanto los modelos utilizados para su obtención tienen mayores garantías de precisión. Por otro lado, en los ríos de zonas altas el verano constituye una época bastante representativa de los periodos de mayor actividad biológica además de contar con una meteorología favorable y proporcionar mejores condiciones de accesibilidad y posibilidades de medición.

En cada uno de los tramos seleccionados para la validación hidráulica, se establecieron una serie de secciones transversales al eje del río (normalmente alrededor de diez) de tal forma que recogieran toda la variabilidad propia del tramo, así como las secciones más limitantes para caudales circulantes mínimos. Estas secciones limitantes corresponden a las que, por

sus características morfológicas particulares (elevada anchura del cauce en relación al calado de agua, facies de aguas rápidas, substrato homogéneo y sección regular, etc.), son especialmente restrictivas en relación a la habitabilidad física que para los peces pueden representar los caudales mínimos establecidos (Palau, 1993). La separación entre dos secciones contiguas fue de tres metros para asegurar que se realizaba una “radiografía” del río a modo de batimetría, a una escala adecuada para estimar la variabilidad y distribución espacial de las características de habitabilidad física en cada tramo.

Para la referenciación geográfica de los tramos de río seleccionados se utilizó un sistema de posicionamiento geográfico (GPS) MAGALLAN 2000 cuyo calibrado se ajustaba con las coordenadas y la altitud conocidas de cada estación de aforo, lo que facilitó después la ubicación precisa de tales tramos sobre la cartografía (tabla 3.1).

Los trabajos de campo incluyeron la recogida de datos de:

- **Morfometría y flujo.** Siguiendo la técnica de estudio clásica (Platts *et al.*, 1987) con algunas modificaciones, cada sección se dividió transversalmente en un mínimo de veinte celdas verticales de igual anchura donde se registró la profundidad de calado (altura de la lámina de agua respecto al fondo del cauce) así como un perfil vertical de velocidades, realizando una medición en cada uno de los intervalos de 10 cm en que se pudiera dividir el calado. Estas mediciones se realizaron con un correntímetro de tipo minimolinet SEBA Z-4.

La medida del calado permitió realizar una batimetría precisa del tramo de río estudiado, donde además se registró la distribución granulométrica en porcentaje del substrato del río según la clasificación de Margalef (1977):

- |                       |                       |                     |
|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| - Limos: < 0,64 mm    | - Arenas: 0,64 – 2 mm | - Gravas: 2 – 64 mm |
| - Cantos: 64 – 250 mm | - Bloques: > 250 mm   | - Roca madre        |

Además, se tomaron una serie de datos para caracterizar de forma general los tramos y ver si existía alguna condición que pudiera ser limitante en cuanto a la aplicación de unos caudales mínimos, es decir, si existía algún elemento del ecosistema fluvial (como por ejemplo un tipo de comunidad natural determinada o unas características de calidad del agua concretas) que pudieran imponer unos requerimientos de caudales mínimos. En este sentido, se tomaron datos referentes a:

- **Características físico-químicas del agua.** En cada tramo se tomaron una serie de datos sobre las características físico-químicas del agua (temperatura del agua, conductividad eléctrica, pH y alcalinidad total, oxígeno disuelto -concentración y saturación-, nitrógeno en forma de amonio, fósforo en forma de fosfato y turbidez). Para ello se utilizó una sonda multiparámetro provista de registrador de medidas YSI-GRANT 3800 además de equipos portátiles de análisis rápido, como en el caso de la alcalinidad total, el amonio y el fosfato, de las series Aquamerck y Aquaquant (MERCK).
- **Comunidades naturales. Vegetación ripícola.** Su estudio se abordó a un nivel muy simple (presencia/ausencia y estructura), y no a nivel taxonómico ni ecológico,

describiéndola en términos de estratos presentes, grado de cobertura y de sombra sobre el cauce.

*Vegetación acuática.* Se realizaron observaciones directas sobre el cauce, no constatándose una presencia significativa de macrófitos en ningún caso, hecho por otro lado lógico al tratarse de ríos de aguas rápidas, con una baja carga de nutrientes y una alta cobertura sobre el cauce por parte de la vegetación de ribera.

*Macrobentos.* En cada tramo se tomaron 1 ó 2 muestras de macroinvertebrados bentónicos (macrobentos), comunidad utilizada como indicadora de la calidad biológica de los tramos de río seleccionados, por medio de un muestreador de pie cuadrado (Surber) de 40 x 40 cm y 250  $\mu\text{m}$  de malla para estimar composición de unidades sistemáticas y abundancia de las mismas de forma orientativa.

### Tratamiento de los datos y presentación

A partir de los datos de cada sección transversal, se han confeccionado mapas en planta de la batimetría y de las velocidades superficiales para cada uno de los tramos de río estudiados, así como de algunas de las principales características morfométricas del cauce (anchura, profundidad) y de la distribución vertical de velocidades para cada sección. Para tal fin, se ha utilizado el programa informático SURFER *vs.* 5.0. En los casos donde no fue posible mantener la distancia de 3 m entre secciones transversales (ríos Cinqueta y Sallent), la interpolación de la batimetría podía resultar un tanto aventurada de modo que se optó por establecer subtramos. A continuación se calcularon, mediante el programa FLOWMASTER (Haestad Methods, 1997), el resto de los parámetros morfométricos e hidráulicos utilizados en este estudio:

- Pendiente longitudinal del cauce en cada sección.
- Profundidad de agua (máxima, media y relativa).
- Profundidad y pendiente críticas.
- Anchura de lámina de agua.
- Superficie de la sección.
- Perímetro mojado.
- Radio hidráulico.
- Velocidad del agua (máxima y media).
- Caudal circulante en el momento del muestreo.

Una vez calculado el  $Q_b$ , se simuló en las diferentes secciones a través del método de la ecuación de Manning (Chow, 1985) utilizando este mismo programa. El proceso de simulación llevado a cabo ha sido, a grandes rasgos, el que se indica a continuación. En primer lugar, considerando como valores fijos y conocidos, el caudal en el momento del muestreo, la velocidad media, el coeficiente de Manning (deducido de las características del tramo y de las tablas de Chow, 1985), la superficie y el perímetro mojado para cada una de las secciones, se calcularon las pendientes longitudinales correspondientes a cada sección concreta. La pendiente longitudinal de cada sección puede diferir de la pendiente media del tramo estudiado dada la heterogeneidad del cauce, que hace que el flujo no sea perfectamente uniforme y sea muy difícil de establecer una pendiente uniforme en toda la sección. Una vez calculada la pendiente, introduciendo el valor del  $Q_b$ , se obtenía el valor de la variación (descenso en todos los casos) de la cota de la lámina de agua para cada una de las secciones. Esta variación de la cota de la lámina de agua, determina lógicamente un cambio en las características morfométricas e hidráulicas de las secciones que se volvieron a calcular y a representar gráficamente



para obtener la batimetría y las secciones transversales correspondientes al Qb. Los resultados obtenidos fueron contrastados con criterios bibliográficos de requerimientos de hábitat físico en cauces.

En la figura 3.2 se puede ver un esquema del procedimiento metodológico descrito.

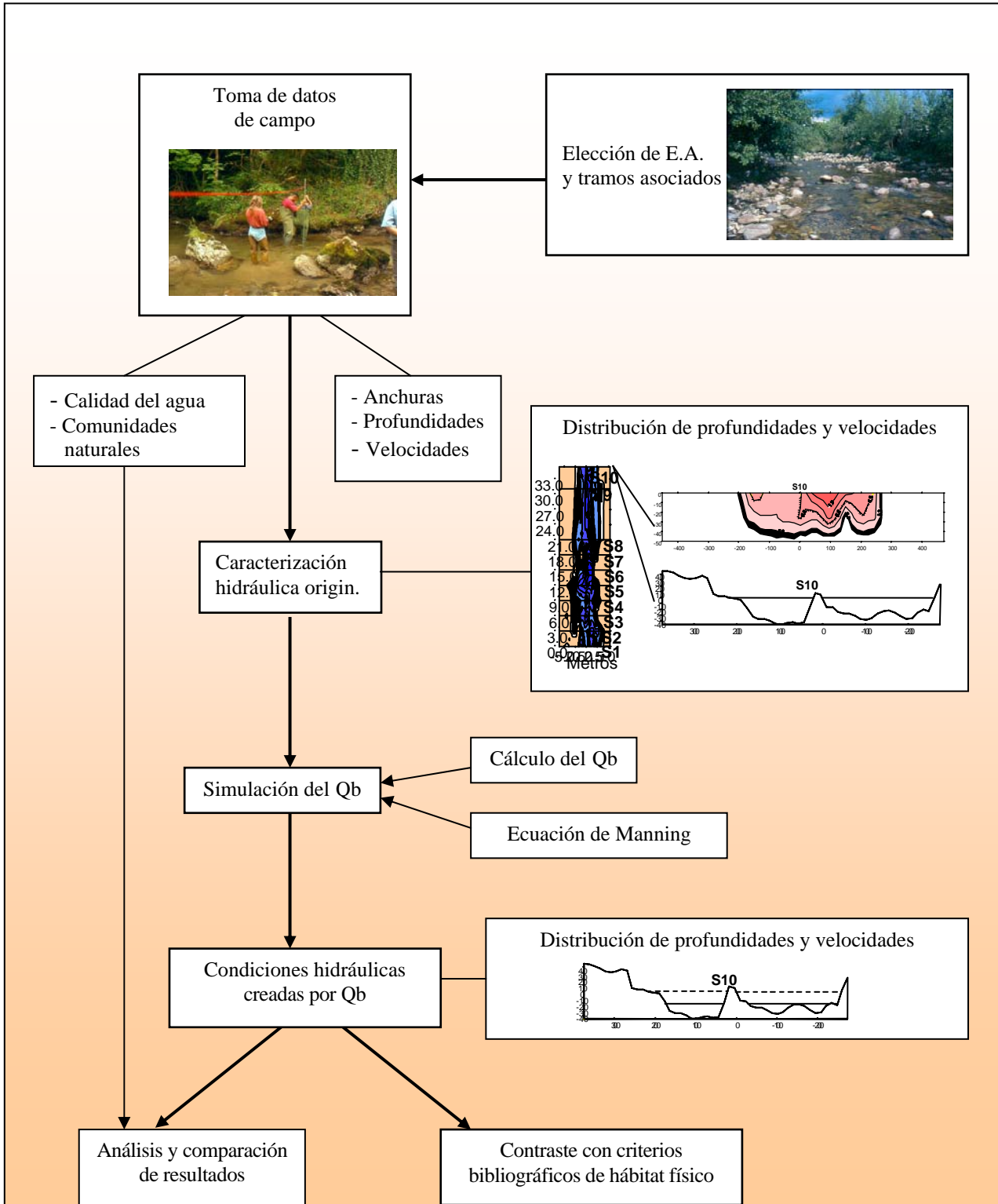


Figura 3.2. Esquema metodológico del análisis de las condiciones hidráulicas generadas por el Caudal Básico.

## **3.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL CAUDAL BÁSICO A LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL EBRO**

### **3.2.1 FUENTES DE INFORMACIÓN Y SELECCIÓN DE ESTACIONES DE AFORO**

Se ha tomado como única fuente de información la página web de la Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) ([www.oph.chebro.es](http://www.oph.chebro.es)) donde se pueden encontrar una serie de archivos con información alfanumérica y cartográfica de la Cuenca Hidrográfica del Ebro en formato compatible con programas comúnmente utilizados para el tratamiento de la información espacial (ARCINFO, ARCVIEW, IDRISI, entre otros). Esta elección se ha realizado por dos motivos principales:

- Evitar posibles incoherencias entre la información utilizada por variaciones en los formatos de los datos debido a distintos orígenes de los mismos.
- Disponer una amplia información ya elaborada por la CHE (tanto de datos alfanuméricos como cartográficos), fácilmente disponible y asequible para todo el público, en la que se apoyan los trabajos de planificación y gestión que se llevan a cabo en la Cuenca Hidrográfica del Ebro.

La selección de estaciones de aforo utilizadas en esta parte del estudio se ha realizado a partir de la red foronómica (información contenida en el archivo AFOROS), escogiendo las estaciones situadas en cauces sometidos a un régimen natural a partir exclusivamente de la información disponible. Para ello, se eliminaron las estaciones de aforos donde aguas arriba de las mismas existan embalses (información contenida en el archivo EMBALSES), instalaciones para acuicultura (información contenida en el archivo ACUI), centrales hidroeléctricas (información contenida en el archivo CENTRAL), tomas de abastecimiento urbano (información contenida en el archivo TABASEC) o posibles derivaciones de agua a la red primaria de canales y acequias (información contenida en el archivo CANAL). En este sentido, de las 267 posibles estaciones de aforo se seleccionaron 60 como estaciones donde existía en principio un régimen natural de caudales.

A continuación se analizaron las series de datos disponibles de estas 60 estaciones tal como se expone en el apartado 4.1.1, de las cuales resultó que 28 disponían de una serie continua de datos fiables o eran series fácilmente depurables de acuerdo a los criterios expuestos en dicho apartado. De las restantes 32 estaciones de aforo, 18 estaban entre las 188 series de caudales medios diarios que la Oficina de Planificación Hidrológica rellenó en el proyecto *Estudio de los caudales característicos para la estimación de ecoregiones en la cuenca del Ebro* ([www.oph.chebro.es](http://www.oph.chebro.es)). Estas series rellenas se han obtenido mediante un análisis de dobles masas acumuladas a partir de series hidrológicas con un comportamiento semejante a la serie que se quiere rellenar (los periodos rellenos no eran demasiado largos y no correspondían con la época de estiaje). Por lo tanto, se seleccionaron un total de 46 series de caudales correspondientes a las estaciones de aforo cuya localización aparece en la figura 3.3.

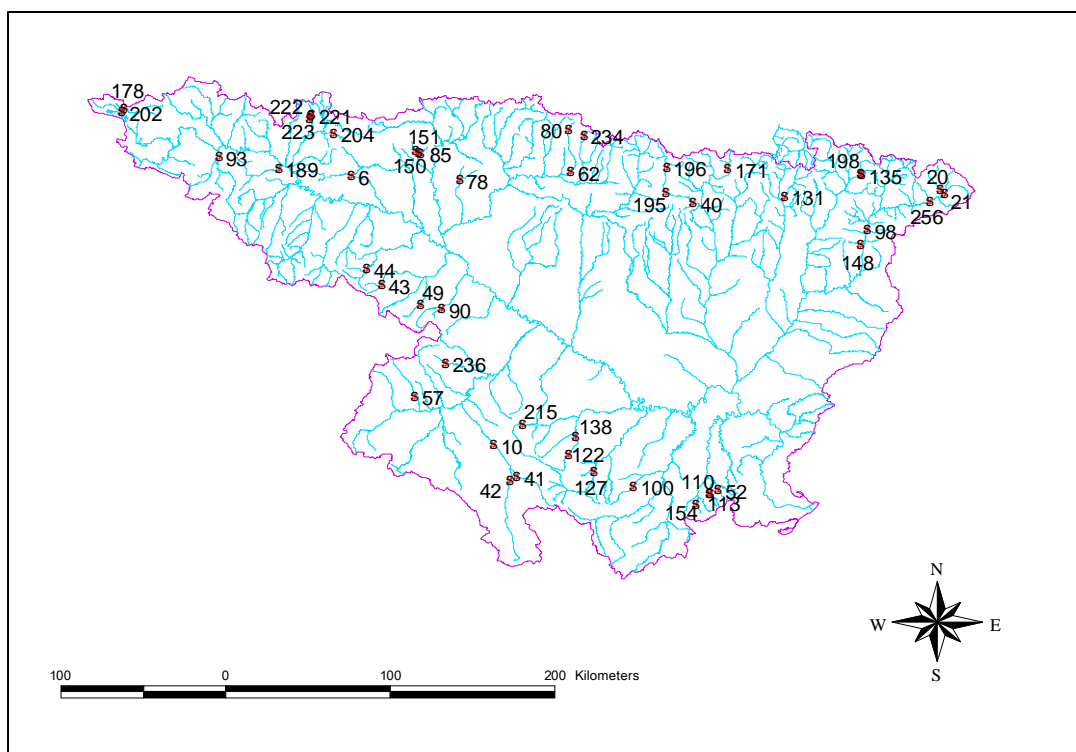


Figura 3.3. Localización de las estaciones de aforo seleccionadas para la aplicación del método del  $Q_b$  a la cuenca del Ebro.

En la tabla 3.2 aparecen los datos geográficos de las estaciones de aforo seleccionadas así como los periodos de años considerados (periodos disponibles al inicio de este trabajo). Como se puede apreciar, el último año del registro utilizado en la mayoría de las estaciones es el 94/95; no obstante, en algunas series de datos se ha desestimado el último o últimos años por falta de datos ya que se prefirió, en la medida de lo posible, la utilización de series reales de caudales antes que rellenar periodos demasiado largos que pudieran incluir épocas de estiaje. En este sentido, al variar los periodos de registros algunas de las estaciones de la Cuenca del Ebro utilizadas en el análisis del método del caudal Básico (apartado 3.1) no pudieron ser utilizadas aquí al no cumplir los requisitos antes mencionados (series de registros completas en régimen natural). En la misma tabla 3.2 se muestra el  $Q_b$  calculado para cada estación así como el periodo de años considerado para su cálculo. Este será el periodo de años considerado para cada serie de datos en el cálculo de las demás variables de tipo hidrológico, ya que en última instancia se va a intentar relacionar el  $Q_b$  con las demás variables hidrológicas y no tiene sentido comparar dos variables calculadas en periodos de años diferentes.

En la figura 3.4 aparece un esquema del proceso de selección de estaciones de aforo y fuentes de información utilizadas.

Tabla 3.2. Lista de las estaciones seleccionadas con datos de registros de caudales y geográficos.

Nº EA	RÍO	POBLACIÓN	COORDENADAS UTM		QB (M <sup>3</sup> /S)	Nº AÑOS	PERÍODO
			X	Y			
6	Ega	Marañón	545858.5	4719917	0.0561	10	1985-95
10	Jiloca	Daroca	632540.1	4552137	0.0210	10	1982-92
20	Carol	Puigcerda	903780.2	4711207	0.1035	9	1986-95
21	Segre	Puigcerda	906058.1	4708847	0.4632	9	1987-96
40	Ara	Boltaña	753493.6	4702928	4.2046	10	1984-94
41	Pancrudo	Navarrete	646521.2	4532369	0.1008	10	1985-95
42	Jiloca	Calamocha	642320.7	4530021	0.6364	10	1985-95
43	Linares	S. P. Manrique	564246	4652197	0.0004	10	1984-95
44	Cidacos	Yanguas	555305.7	4661730	0.0470	10	1983-93
49	Añamaza	Devanos	587638.9	4639912	0.0296	10	1984-95
52	Matarraña	Beceite	768742.5	4523623	0.1047	10	1983-94
57	Deza	Embid de Ariza	584624.9	4582195	0.0387	10	1984-94
62	Veral	Binies	679212.9	4722029	0.4090	10	1985-95
78	Cemborain	Arinoain	611623.6	4717228	0.0101	10	1985-95
80	Veral	Zuriza	678226.8	4748245	0.1667	9	1986-95
85	Ubagua	Riezu	585084.8	4735514	0.1396	10	1983-93
90	Bco. del Val	Los Fayos	600841.8	4636886	0.0281	10	1985-95
93	Oca	Oña	465605.4	4731645	0.8607	10	1985-95
98	Vansa	Monestir	859223.3	4685978	0.0205	10	1985-95
100	Guadalopillo	Berge	717129.3	4526304	0.0419	10	1985-95
110	Pena	Beceite	764084.6	4521342	0.0123	10	1985-95
113	Figuerales	Valderrobres	763048.9	4521618	0.0004	10	1981-91
122	Aguas Vivas	Blesa	677689.1	4546296	0.0034	10	1985-95
127	Martin	Alcaine	693152.3	4535557	0.1942	10	1985-95
131	Noguera Tor	Llesp	808923.3	4706974	1.4743	10	1985-95
135	Tor	Alins	855658.9	4720469	0.3630	9	1986-95
138	Aguas Vivas	Moneva	681767.1	4557214	0.0000	10	1982-92
148	Sallent	Coll de Nargó	855324.5	4677229	0.0077	10	1985-95
150	Salado	Estenoz	587836.9	4733388	0.0413	10	1985-95
151	Ubagua	Muez	586699.7	4733991	0.1777	10	1985-95
154	Tastavins	Peñarroya	755325.7	4514299	0.0060	10	1984-95
171	Cinqueta	Molino de Gist.	774639.5	4723554	0.9217	10	1983-93
178	Ebro	Reinosa	407903.3	4761767	0.4563	10	1984-94
189	Oroncillo	Oron	501731.9	4724609	0.2199	10	1985-95
195	Ara	Fiscal	736941.3	4709451	3.4498	10	1985-95
196	Ara	Torla	737386.1	4724864	1.5808	10	1983-93
198	Vallferrera	Alins	855345.6	4720789	0.3471	10	1985-95
202	Izarilla	Matamorosa	406810.3	4759375	0.1133	10	1985-95
204	Alegría	Matauco	535239.7	4745779	0.0924	10	1985-95
215	Huerva	Cerveruela	649889.5	4564672	0.0361	10	1985-95
221	Subialde	Larrinoa	522009.4	4757542	0.0492	10	1985-95
222	Suibarri	Gopegui	521042.1	4757047	0.0001	9	1984-93
223	Suibarri	Ondategui	520754.1	4755377	0.0001	6	1987-93
234	Subordan	Oza	687108.6	4744991	0.3468	9	1986-95
236	Aranda	Maidevera-CE	603087.4	4602563	0.0707	10	1985-95
256	Segre	Isobol	897124.3	4703086	0.8466	10	1985-95

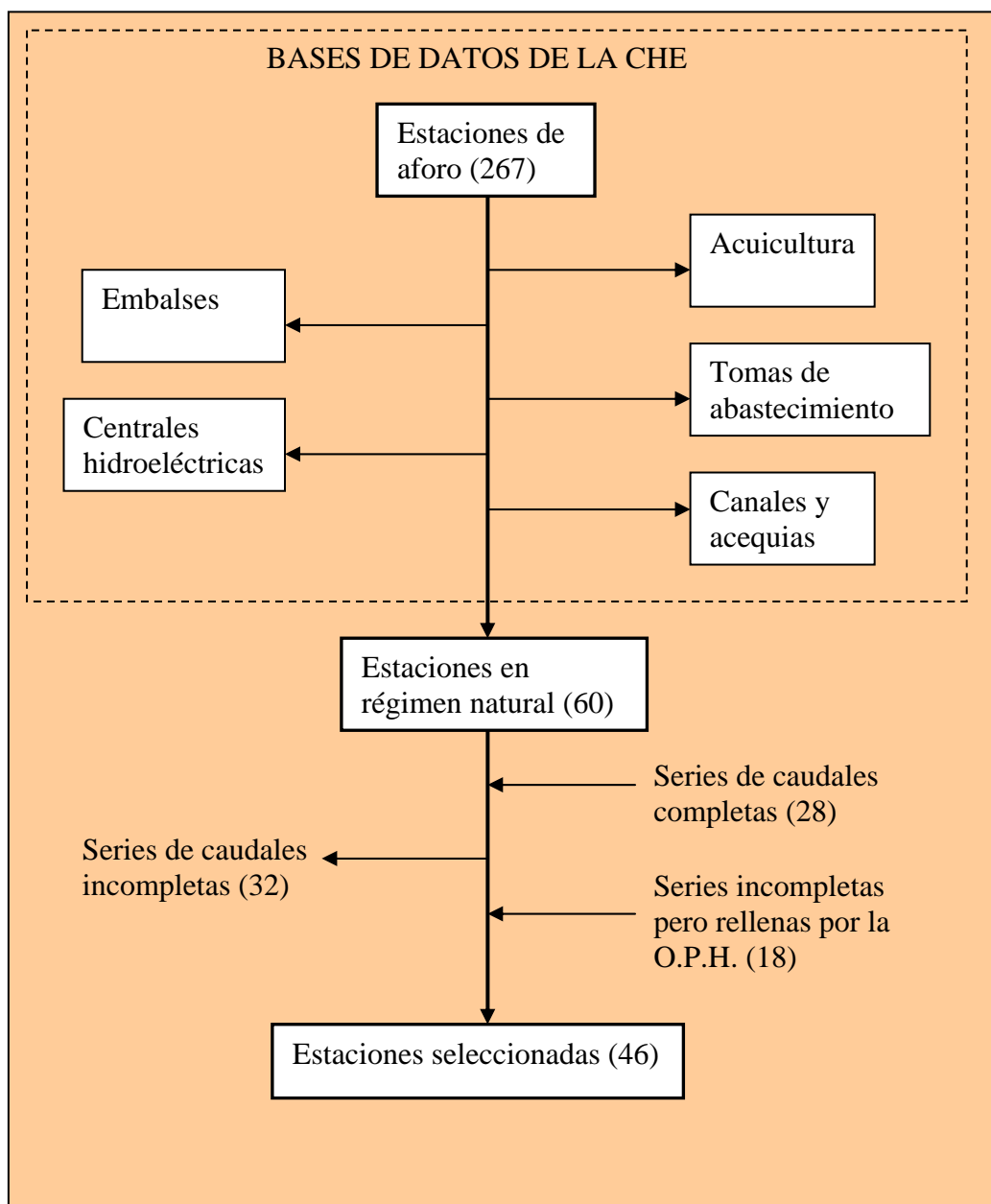


Figura 3.4. Esquema del proceso de selección de estaciones de aforo y fuentes de información utilizadas.

### 3.2.2 SELECCIÓN DE VARIABLES

El número de variables utilizadas para caracterizar hidrológicamente la cuenca del Ebro con el fin de regionalizar la determinación de caudales de mantenimiento ha sido elevado debido a que incluye ríos con regímenes hidrológicos muy variados y por lo tanto un número pequeño de descriptores básicos puede no ser suficiente para caracterizar su hidrología (Growth y Marsh, 2000). Así, se seleccionaron un total de 132 variables, incluyendo tanto parámetros definidos expresamente para el presente

estudio como variables recopiladas a partir de referencias bibliográficas identificadas como parámetros que están o pueden estar relacionados con la determinación de caudales mínimos, así como variables utilizadas normalmente para caracterizar hidrológicamente cuencas o cursos de agua (ver listado de variables en el anexo 1). Sobre esta primera selección se realizó un análisis de correlación para eliminar las variables peor correlacionadas con  $Q_b$  y/o que aporten una información redundante, es decir, que sean dos formas de expresar lo mismo. Finalmente se seleccionaron 51 variables, que para una mayor facilidad de tratamiento y análisis de resultados se agruparon de la siguiente forma:

- *Variables descriptoras de la cuenca vertiente.* Se incluyen parámetros descriptivos de las cuencas vertientes definidas para cada estación de aforos así como del comportamiento o respuesta hidrológica de las mismas.

- *Variables resultado del análisis de períodos de caudales mínimos.* Se incluyen parámetros que consideran los periodos de caudales mínimos, tanto en longitud de los mismos en días, como en cantidad de agua (expresada en porcentaje del caudal medio anual) que se requeriría para mantener los caudales circulantes por encima de un valor prefijado. Estos parámetros se han calculado con la ayuda del programa SPELL en AQUAPAK (Gordon *et al.*, 1992).

- *Variables relacionadas con la curva de caudales clasificados y su relación con el  $Q_b$ .* Se incluyen parámetros que muestran el porcentaje de tiempo durante el cual el caudal es superior a una cantidad dada, con independencia de su continuidad en el tiempo, y cómo se sitúa el  $Q_b$  en esta curva.

- *Variables descriptoras de la hidrología general de la cuenca.* Se incluyen variables seleccionadas en base a su utilidad, ya contrastada en la literatura, como indicadores de distintos aspectos de la hidrología de los ríos, así como aquellas que se ha considerado pueden ser potencialmente importantes para la vida acuática. Así, se han incluido parámetros que reflejan la predictibilidad de los caudales, así como variables características de caudales altos, bajos y medios, con carácter mensual, anual, y para todo el periodo completo considerado.

- *Variables que expresan variabilidad de caudales,* tanto a nivel intranual como interanual.

### **3.2.3 ANÁLISIS DE DATOS**

Sobre las variables finalmente seleccionadas se realizó, partiendo de cada grupo de variables, un análisis de componentes principales identificando los ejes principales o combinaciones de variables que explican las diferencias y afinidades entre las estaciones. Estos ejes se utilizaron en un análisis posterior de tipo cluster (en cada grupo de variables) para agrupar a su vez las estaciones en bloques homogéneos. A continuación se realizó un nuevo análisis de tipo cluster sobre el conjunto de variables utilizando los ejes definidos en los análisis de componentes principales de los distintos grupos de variables como nuevas variables para ver los bloques globales de estaciones con características homogéneas que dan lugar a la regionalización de la cuenca del Ebro.

En estas regiones finales, y de forma individual, se procedió al estudio de las variables para ver cuáles y en qué medida contribuyen a la predicción de Qb, mediante un análisis de regresión. La figura 3.5 muestra un esquema del proceso descrito.

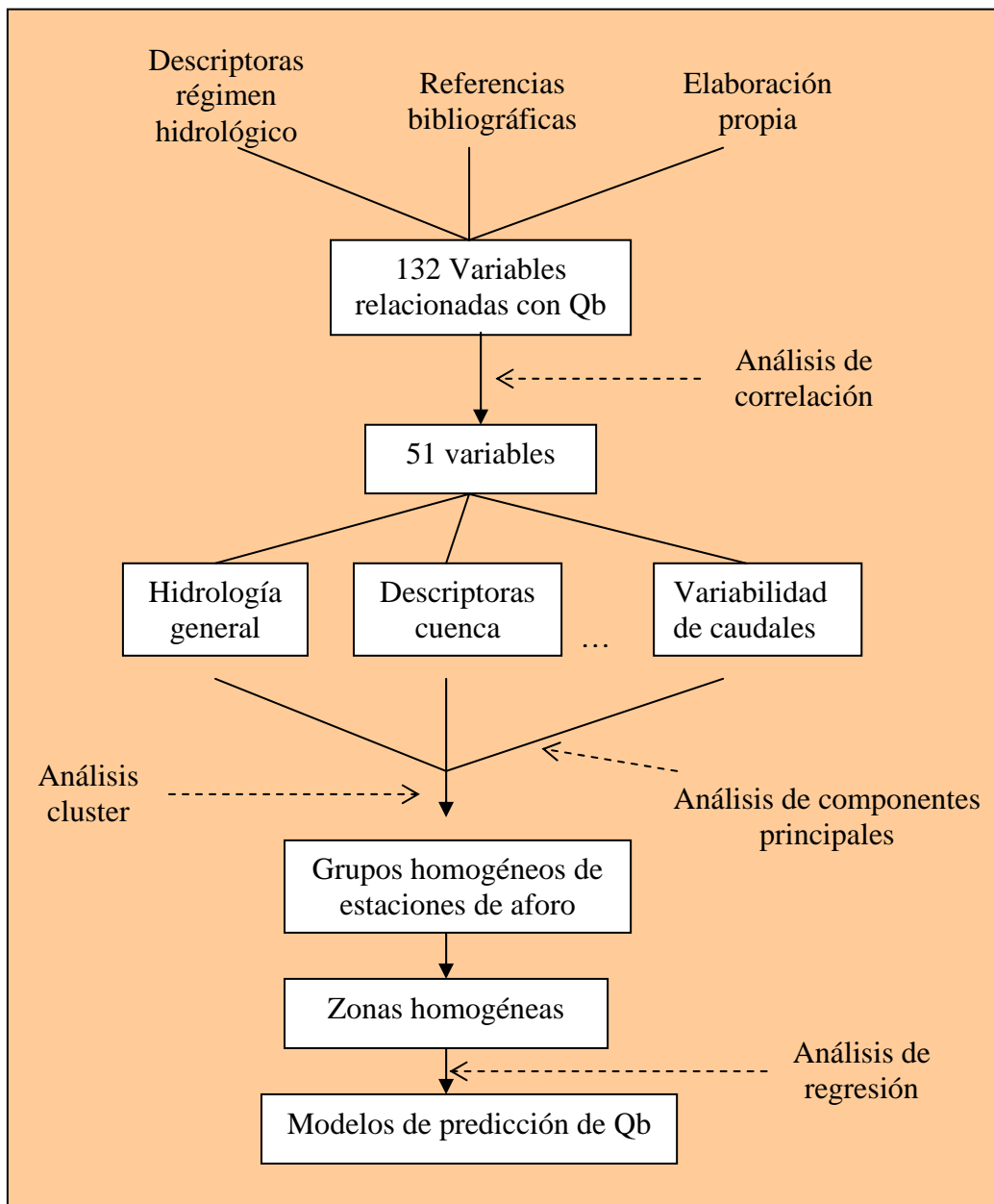


Figura 3.5. Esquema metodológico de la aplicación del Método del Qb a la Cuenca Hidrográfica del Ebro.

Por último, se abordó la determinación del Qb en toda la cuenca del Ebro desde un punto de vista práctico extrapolando los Qb obtenidos en las diferentes estaciones de aforo a toda la superficie de la cuenca, teniendo en cuenta los criterios de proximidad y afinidad de características geográficas.

### **3.3 APLICACIÓN DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA) A LA DETERMINACIÓN DE QB**

#### **3.3.1 INTRODUCCIÓN**

En la ordenación de recursos hídricos en los últimos años se ha prestado una creciente atención a los modelos basados en redes neuronales artificiales (RNA) (e.g. ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, 2000; Bowden *et al.*, 2005). Entre los principales campos de aplicación se pueden citar la predicción de precipitaciones (Valverde Ramírez *et al.*, 2005), la creación de modelos de calidad de agua y bioindicadores (por ejemplo Schleiter *et al.*, 1999; Maier y Dandy, 1996), la predicción de caudales (Moradkhani *et al.*, 2004; Castellano-Méndez *et al.*, 2004), o el desarrollo de modelos precipitación-escorrentía (por ejemplo Hsu *et al.*, 1995; Minns y Hall, 1996; Tokar y Jonson, 1999), donde se muestra el gran potencial que tienen las RNAs en el campo de la hidrología. Además, el hecho de que normalmente exista una alta correlación entre las variables independientes y el hecho de que sus distribuciones se alejen de la normalidad, hace que con frecuencia se vulneren los supuestos de aplicación de los modelos estadísticos más convencionales, y sugiere la ventaja de utilizar modelos robustos e independientes de la distribución de los datos, como las redes neuronales (Nelson *et al.*, 2000; Atzberger, 2004).

Las RNA son modelos matemáticos basados en el sistema de computación que se cree que utiliza el cerebro humano (Vega *et al.*, 1999; Sánchez y Alanis, 2006). Estos modelos están constituidos por un conjunto de neuronas, nodos o elementos de proceso interconectados entre sí y organizados en niveles, dentro de una estructura denominada “arquitectura” de la red. Para facilitar la construcción de estos modelos, existen numerosos programas informáticos que permiten la construcción de redes simuladas por ordenador (Hilera y Martínez, 1995).

La arquitectura inicial de una red se diseña a partir de unas determinadas variables de entrada y salida, pero la configuración final depende de un proceso iterativo que ajusta la estructura (niveles intermedios) y el peso de las conexiones en función de los datos, y que denominamos “entrenamiento” (Figura 3.6). Las observaciones (hidrológicas en este caso) son presentadas a las redes, propagadas a través de ellas y transformadas miles de veces para obtener en cada iteración un resultado que se evalúa respecto al esperado. El error cometido en la predicción o clasificación en cada iteración se emplea en la modificación de la estructura para la siguiente iteración, haciendo variar en peso las conexiones entre los distintos elementos de proceso hasta que la red “converge”. En este momento la red alcanza su menor nivel de error (*best performance*) o mayor precisión en la modelización de la relación que une las variables de entrada y salida. La fase de aprendizaje a partir de ejemplos permite realizar tareas “inteligentes” a las redes simuladas, reconocer tendencias y patrones en los datos de partida y generalizar el conocimiento adquirido a la determinación de valores para casos nuevos (Vega-García *et al.*, 1996).



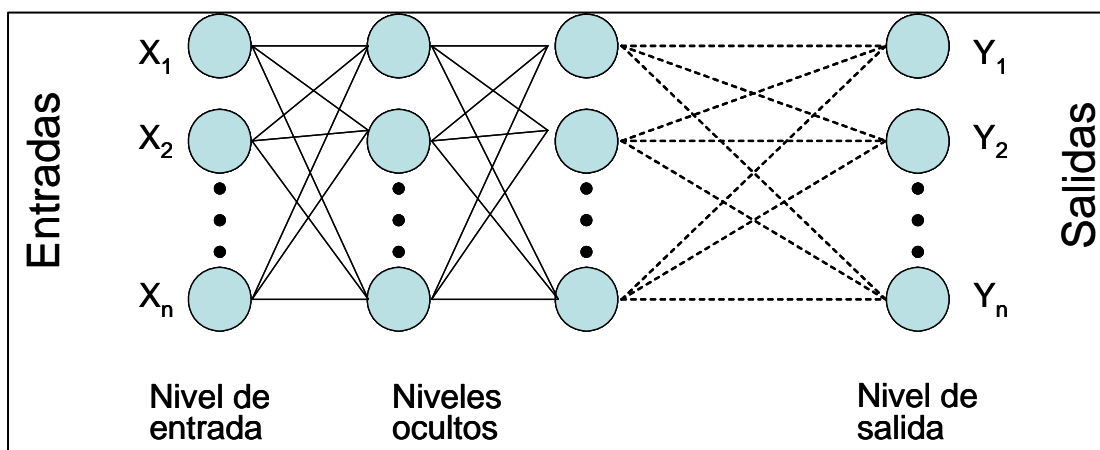


Figura 3.6. Estructura general de una red multinivel (modificado de Hilera y Martínez, 1995).

Debido a estas características, las RNAs pueden convertirse en una herramienta muy útil en la determinación de caudales de mantenimiento de los cursos de agua. El funcionamiento interno de las redes, su estructura y variables de entrada deberán examinarse desde el conocimiento hidrológico para determinar finalmente su fiabilidad y aplicabilidad.

El objetivo de esta parte del trabajo es identificar los parámetros o variables que más influyen en la determinación del caudal de mantenimiento mediante otra herramienta distinta a la estadística tradicional, y analizar la capacidad de los modelos de red neuronal para la predicción de los valores de estos caudales en la cuenca del Ebro, incluyendo aquellos tramos en los que la información necesaria no está disponible.

### 3.3.2 ÁREA DE ESTUDIO, NATURALEZA Y CARACTERÍSTICAS DE LAS VARIABLES

El área de estudio es la misma que en el apartado anterior, es decir, la totalidad de la Cuenca del Ebro, considerando las mismas 46 estaciones de aforo distribuidas uniformemente por los tramos medios-altos de los ríos, recogiendo así la posible variabilidad hidrológica que pudiera existir dentro de la propia cuenca (Figura 3.3). Como ya se apuntó anteriormente, estas estaciones corresponden a tramos sometidos a un régimen de caudales naturales, y además disponen de una serie continua de datos fiables de caudales (Tabla 3.2).

Como variable dependiente se ha considerado el  $Q_b$ , y como variables independientes se escogieron en un primer análisis el mismo conjunto de variables finalmente seleccionadas y utilizadas para el apartado 3.2.

Ahora bien, algunas de estas variables no son obtenibles directamente de bases de datos hidrológicos generales, sino que requieren cálculos complejos a partir de otras informaciones hidrológicas básicas. Así, con el objetivo de favorecer la posible aplicación operativa de redes neuronales en la determinación de caudales de mantenimiento mínimos, se seleccionó un segundo grupo de 9 variables independientes (Tabla 3.3) descriptoras del régimen general de caudales, que son generalmente accesibles para investigadores y/o gestores sin coste económico o procedimiento de cálculo asociado.

Estos datos utilizados son públicos y proceden de la Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) ([www.oph.chebro.es](http://www.oph.chebro.es)), que dispone de una serie de archivos con información alfanumérica y cartográfica en formato compatible con programas comúnmente utilizados para el tratamiento de la información espacial (ARCINFO, ARCVIEW, IDRISI, entre otros). Esta amplia base de datos elaborada por la CHE (tanto de datos alfanuméricos como cartográficos), sirve de apoyo a los trabajos de planificación y gestión que se llevan a cabo en la Cuenca Hidrográfica del Ebro. Así, a partir de los datos hidrológicos contenidos en esta base de datos se han calculado tanto la variable dependiente como las independientes para las 46 estaciones de aforo objeto de modelización.

Tabla 3.3. Variables hidrológicas generales calculadas por la Confederación hidrográfica del Ebro para todas las estaciones de aforo

<b>Variables</b>
Q medio = Caudal medio
QC = Q máximo absoluto de las medias diarias
QMC = Q igualado o superado en 10 días al año
Q90 = Q igualada o superado en 90 días al año
Qs = Q igualado o superado la mitad del año
QMm = Q característico del periodo medio
Q270 = Q igualado o superado en 270 días al año
QME = Q igualado o superado en 355 días al año
QE = Q mínimo absoluto de las medias diarias

### 3.3.3 ARQUITECTURA DE LAS REDES NEURONALES

La construcción de un modelo de RNA tiene tres fases principales:

- *Selección de variables*, escogiendo las variables que mejor se relacionan y explican la variable dependiente, y, si fuese necesario, transformado los datos de partida (por ejemplo en cuanto a formato y escala) de modo que sean idóneos para la construcción de modelos con la máxima eficacia de predicción.
- *Construcción y entrenamiento (aprendizaje) de la red*, donde a partir de la observación de un conjunto de ejemplos que relacione dos fenómenos de interés, que constituyen los ejemplos de entrada-salida deseada, se establece una estructura de la red de forma que se minimice el error de salida de la misma a lo largo del conjunto de ejemplos (Olmeda y Barba-Romero, 1993).
- *Validación de la red*, que consiste en la comprobación de la eficacia del modelo en la predicción de la variable dependiente utilizando observaciones no empleadas en la construcción del modelo.

Existen numerosas estructuras de redes neuronales y reglas de aprendizaje definidas en la literatura que han sido aplicadas con éxito en el campo de la hidrología (Moradkhani *et al.*, 2004), y que responden a las distintas técnicas empleadas en desarrollar cada una de estas fases.

En el presente estudio se ha utilizado para la predicción de valores de caudales de mantenimiento un modelo de red de uso muy común, el perceptron multi-capas, con elementos de proceso o nodos no lineales (*non-linear feed-forward neural model*). Para el desarrollo de dicho modelo se utilizó el software NeuralSIM<sup>TM</sup> (NeuralWare, 2000). Este modelo cuenta con numerosos antecedentes en estudios que van desde el reconocimiento de objetos a la medida de tasas de evaporación de suelos (Neuralware, 2000).

Previamente a la construcción de los modelos se segregó aleatoriamente un 20 % de los datos para la validación de los mismos. Con el 80% restante de los datos de partida se realizó otra división posterior, también aleatoria, en dos bases de datos que contenían el 70% y 30% de los datos. La mayoría de los datos (70%) se utilizó para el proceso de entrenamiento, mientras que el subconjunto menor (30%) ha servido para evaluar periódicamente la progresión del aprendizaje y prevenir un sobreentrenamiento de los modelos que hubiera limitado su capacidad de generalización al ser aplicados a datos no utilizados en la construcción. Se han construido y entrenado numerosas redes utilizando diferentes estrategias y parámetros de entrenamiento, con pesos iniciales aleatorios.

La construcción de este modelo de red requiere completar las siguientes fases:

### **Selección de variables**

La selección de variables está basada en un algoritmo genético (Koza, 1993) que evalúa todas las posibles combinaciones entre las variables independientes para seleccionar las más relevantes. Así, el programa analizó todos los subconjuntos posibles de las variables de partida (tanto en su forma original como bajo diversas transformaciones) para determinar cual de esos subconjuntos es más explicativo en relación al fenómeno bajo estudio (Qb). Para ello, se utiliza una red neuronal de características simples (similar a una regresión logística) aplicada a cada subconjunto (Neuralware, 2000). El subconjunto escogido determina las variables que constituyen la capa de entrada en el modelo de red.

### **Construcción y entrenamiento de la red**

La regla de aprendizaje elegida es el gradiente adaptativo (*adaptive gradient-learning rule*) (Fahlman y Lebiere, 1988; Bridle, 1990), variante del algoritmo general de retro-propagación (Werbos, 1994). Así, la arquitectura de la red no se fija antes del aprendizaje (como ocurre en las redes de retro-propagación), sino que se determina durante éste mediante el método de correlación en cascada establecido por Fahlman y Lebiere (1988), que en general permite conexiones directas entre los elementos de proceso de todos los niveles (datos de entrada, intermedios, y resultados). La forma de proceder es la siguiente:

Se parte de una capa de entrada con las variables seleccionadas en la fase anterior y de una capa de salida con la variable a predecir (en nuestro caso el Qb), conectadas por pesos iniciales asignados de forma aleatoria.

La construcción de la red implica tanto la adición sucesiva de nodos en la capa oculta (entre la de entrada y la de salida) como la modificación de los pesos en cada fase iterativa de presentación de datos a la red. La modificación se desencadena a partir de la medición del error cometido en la salida de la red en cada iteración. La adición se limitó en este caso a un número entre 1 y 3 en cada iteración y siempre se conectaron los

nodos anteriormente introducidos al último incorporado. La regla de aprendizaje aplicada tenía como objetivo maximizar la correlación entre los valores de  $Q_b$  observados y los producidos por la red (función de evaluación para el cálculo del error: correlación). Dada la importancia de una adecuada predicción de los valores más extremos de la base de datos, también se construyeron redes con función de evaluación basada en la disminución del RMS, que habitualmente producen menores errores máximos absolutos en las predicciones. Cada cierto número de iteraciones se detuvo el aprendizaje de la red para evaluar su capacidad predictiva en los datos de test. Esta operación garantiza la capacidad de generalización de las redes y previene el sobreentrenamiento (memorización de los datos de partida).

### **Validación de la red**

La capacidad de determinación o predicción del caudal básico  $Q_b$ , a partir de las variables hidrológicas, se evaluó inicialmente mediante el cálculo de la correlación lineal entre el valor observado y el estimado por cada red, en los tres conjuntos de datos (entrenamiento, test y validación). Alternativamente, se procedió a la construcción de redes con el objetivo (función de evaluación) de reducir el error medio cuadrático en los datos de entrenamiento y test. En la selección de los mejores modelos también se analizaron otros diagnósticos, como la entropía relativa (baja) y la correlación interna (alta) de la red (Neuralware, 2000), y la complejidad de su arquitectura (mejor red cuanto menor número de variables de entrada, elementos de proceso y número de niveles).

La determinación de las variables independientes con mayor influencia en la salida ( $Q_b$  estimado) de cada red, o análisis de sensibilidad, se efectuó mediante la matriz de derivadas parciales de la variable de salida con respecto a las variables de entrada, aunque también se consultaron los valores de frecuencia de selección de cada variable por parte del algoritmo genético. El análisis de sensibilidad supone una medida cuantitativa de la variación que experimenta el caudal de mantenimiento calculado por la red cuando varía la variable  $X_i$  correspondiente. Valores altos de esta medida de sensibilidad indican que ligeras variaciones de la variable  $X_i$  producen cambios considerables en el caudal de mantenimiento calculado, mientras que valores bajos indican que variaciones de mayor amplitud en dicha variable de entrada no suponen grandes variaciones en el caudal de mantenimiento. Un signo positivo en el análisis de sensibilidad indicaría una relación directa entre variable dependiente e independiente; un signo negativo indicaría una relación inversa. Al mismo tiempo, una alta frecuencia de selección de una variable, por parte del algoritmo genético de selección de variables previo a la construcción de cada red, también es indicativo de la importancia de esa variable en la modelización del caudal básico.

El mismo perceptrón multi-capa se utilizó para modelizar el caudal básico ( $Q_b$ ) con el grupo reducido de 9 variables independientes definidas para todas las estaciones de aforo por la Confederación hidrográfica del Ebro. En este sentido, se procedió a la construcción y evaluado de numerosas redes para la predicción de caudales de mantenimiento, desarrolladas siguiendo los mismos procedimientos de división de los datos de partida y de construcción de modelos descritos anteriormente.

## **Capítulo 4. Resultados y discusión**

### 4.1 Análisis del método de cálculo de $Q_b$

4.1.1 Análisis de la serie de datos de partida

4.1.2 El año hidrobiológico

4.1.3 Número de años considerados para el cálculo de  $Q_b$  y su validez temporal

4.1.4 Proceso de cálculo del  $Q_b$

4.1.5 Número de orden de las medias móviles

4.1.6 Tasa de cambio de caudal en el tiempo

4.1.7 El Caudal de Mantenimiento

4.1.8 Significación hidrológica del  $Q_b$

4.1.9 Condiciones hidráulicas generadas por el  $Q_b$

### 4.2 Aplicación del método del $Q_b$ a la cuenca hidrográfica del Ebro

4.2.1 Regionalización de la cuenca del Ebro en función del  $Q_b$

4.2.2 Determinación del  $Q_b$  en las distintas zonas homogéneas

4.2.3 Aplicación práctica de determinación de  $Q_b$  en la cuenca del Ebro

### 4.3 Aplicación de Redes Neuronales Artificiales (RNA) a la determinación de $Q_b$ en la cuenca del Ebro

4.3.1 Construcción de RNA a partir de la base de datos general

4.3.2 Construcción de RNA a partir de la base de datos reducida (9 variables)

## **4.1 ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CÁLCULO DEL $Q_b$**

En este apartado se va a analizar y justificar los distintos criterios de cálculo utilizados, de modo que se elimine cualquier apariencia de arbitrariedad, analizando las alternativas posibles de cálculo, así como analizar desde un punto de vista hidrológico e hidráulico (hábitat físico) los Caudales Básicos obtenidos como resultado de la aplicación del método.

### **4.1.1 ANÁLISIS DE LA SERIE DE DATOS DE PARTIDA**

Una de las características del método del Caudal Básico es la gran dependencia que tiene de la serie de datos de partida, es decir, de la serie de caudales medios diarios del periodo de años considerado. Como ya se apuntó anteriormente, este método se entiende como una herramienta para extraer la información contenida en las series de caudales diarios. Esta información nos condicionará la organización, estructura y funcionamiento del ecosistema fluvial y nos permitirá establecer un caudal mínimo de mantenimiento. Además, debido al propio proceso de cálculo, la correcta aplicación del método exige la existencia de una serie continua de datos fiables, puesto que un error al realizar la lectura en la estación de aforo o en la posterior transcripción y tratamiento de los datos puede resultar en la obtención de unos resultados erróneos, a pesar de que el hecho de utilizar medias en la matriz de caudales mínimos acumulados (matriz 10 x 100 de la figura 2.1), este tipo de efectos puede quedar atenuado.

Por todo ello, antes de aplicar el método a una serie de registros históricos de caudales medios diarios conviene hacer un análisis y una depuración si procede de la misma para corregir estas dos posibles fuentes de error: la discontinuidad de la serie de datos o falta de caudales medios diarios para un periodo concreto, y errores en la serie de datos. A continuación se van a tratar en mayor profundidad estos dos aspectos y se van a dar posibles soluciones para subsanarlos.

#### **4.1.1.1 Discontinuidades en la serie de datos de partida**

Al trabajar con series de datos de estaciones foronómicas correspondientes a periodos de años relativamente largos, es muy frecuente encontrar que estas series no son continuas sino que existen lagunas en los registros disponibles. Actualmente, en la mayoría de los casos no es posible completar esas lagunas con una garantía suficiente ya que no existen modelos fiables para predecir caudales medios diarios o no se suele disponer de todos los datos necesarios para su aplicación (parámetros del ciclo del agua en esa cuenca). Además, tanto las precipitaciones (origen de los recursos hídricos) como el flujo de caudales en ríos presenta una gran variabilidad interanual y no existe una dependencia temporal de las escorrentías anuales, es decir, no se puede mejorar la predicción de los caudales circulantes en un año con los registros de los años anteriores (MMA, 1998).

No obstante, se van a dar unas recomendaciones para la utilización de estas series discontinuas en el cálculo del  $Q_b$  dependiendo del tamaño y posición de esas lagunas dentro de cada periodo hidrológico:

- Cuando las lagunas de datos corresponden a varios meses o incluso un año entero, ese año se debe desestimar para el cálculo del  $Q_b$ .
- Para lagunas de menor tamaño, cuando la falta de datos se da en periodos que no son de estiaje las series se pueden rellenar sin mayor problema ya que esos datos no van a afectar el cálculo del  $Q_b$ , el cual se basa en los caudales de estiaje. Así, los caudales medios diarios se pueden calcular realizando un análisis de dobles masas con estaciones próximas que tengan series de registros completas, o utilizando la media mensual interanual, la cual se puede multiplicar por un coeficiente para adaptarla a las condiciones de sequía, humedad o intermedias del año a completar (caudal medio del año a completar /caudal medio interanual). Si la carencia de datos corresponde a uno o varios días aislados, éstos se pueden calcular por interpolación entre la media diaria del día anterior y posterior al requerido.
- Cuando la falta de datos se da en el periodo de estiaje, ese año habría que descartarlo ya que dependiendo del valor que se utilice para completar la serie el valor del  $Q_b$  calculado puede variar. Una excepción constituiría el caso de que únicamente faltase un día aislado en el que los valores de los caudales medios del día anterior y posterior son iguales o muy parecidos, en cuyo caso se podría utilizar la media de los mismos para rellenar la serie.

Por último, hay que tener en cuenta que el desestimar un año por falta de datos puede inutilizar o modificar notablemente el periodo de años a considerar para el cálculo del  $Q_b$ , ya que este método propone la utilización de series recientes completas y continuas. Así, dependiendo de los objetivos del estudio y de las características y tendencia (si es que existen) de las aportaciones naturales de la cuenca, puede ser más aconsejable la utilización de series continuas aunque no cumplan estrictamente el criterio de cercanía en el tiempo, o la de series que no sean totalmente continuas (falte únicamente un año) pero que sean lo más actuales posible.

#### **4.1.1.2 Posibles errores en los datos de partida**

Al trabajar el método en su proceso de cálculo con los datos individuales de la serie de caudales tanto en su valor absoluto como en su secuencia en el tiempo, cualquier error en la toma, transcripción o tratamiento de estos datos puede resultar en un cálculo erróneo del  $Q_b$ . Por ello, es preciso detectar la existencia de estas anomalías o errores en la serie para intentar corregirlas o, si esta opción es imposible, despreciar ese periodo de datos o al menos ser consciente de las limitaciones de los resultados obtenidos.

Al trabajar con los años como unidad temporal base para el cálculo del  $Q_b$ , el análisis de las series de caudales medios diarios es aconsejable realizarlo año por año. La mejor forma de detectar posibles errores es un análisis gráfico. Para ello, hay que representar los 365 caudales medios diarios del año (hidrograma anual) y buscar gráficamente posibles discontinuidades o cambios bruscos en dicho hidrograma (Figura 4.1). Estas anomalías en la curva pueden ser de dos tipos:

- Un caudal puntual tiene un valor mucho mayor que el que le precede y el que le sigue. En este caso, hay que analizar si ese pico en la curva es debido a un fenómeno natural como puede ser un aumento de la precipitación en esa fecha en la cuenca vertiente que ha provocado un incremento de caudal puntual, en cuyo caso dicho incremento no sería tan puntual sino que se prolongaría en mayor o menor medida en

el tiempo y se podría detectar en la serie de datos originales, o puede ser debido a un error en el dato. Para corregir el error, bastaría con sustituir dicho valor por el promedio del valor del dato anterior y del posterior. De esta forma no se alteraría la tendencia de la serie y no afectaría al proceso de cálculo del  $Q_b$ .

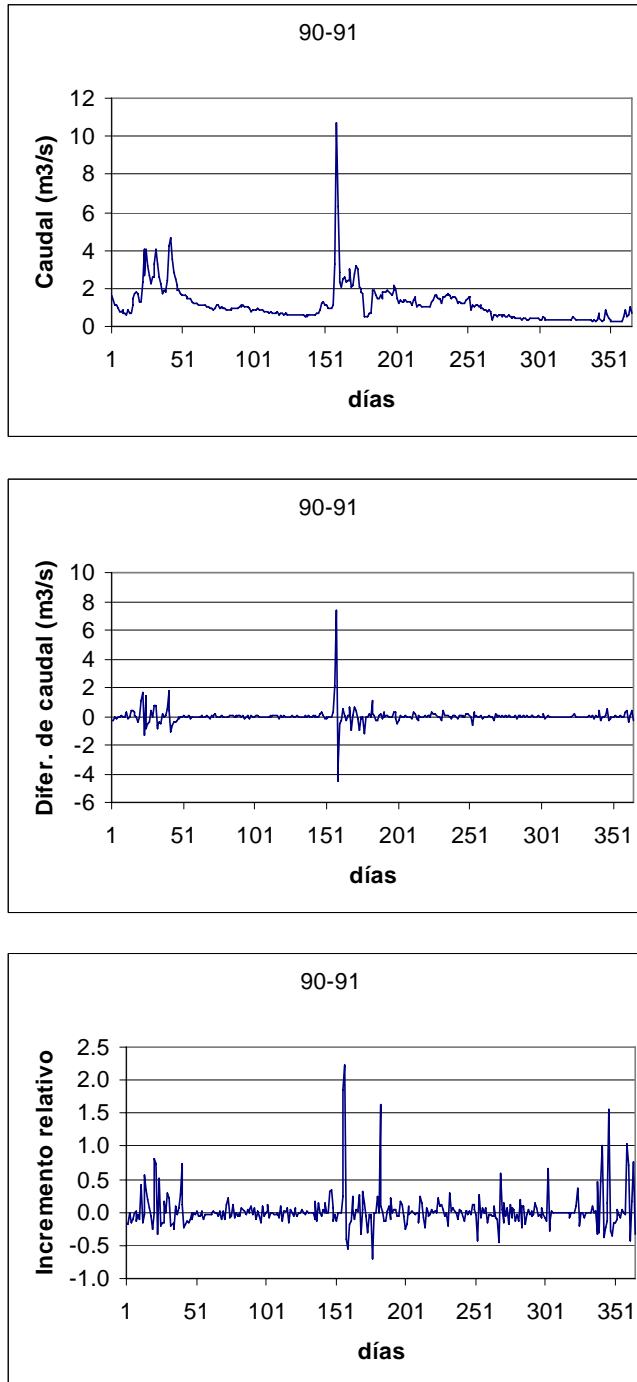


Figura 4.1. Gráficas que se deben utilizar en el análisis y proceso de depuración de los datos de partida.

- Un caudal puntual tiene un valor mucho menor que el que le precede y el que le sigue. En este caso, es difícil que el caudal circulante de forma natural en un río disminuya puntualmente en un día, por lo que seguramente se deba a un error en el



dato. Para corregir este error, como en el caso anterior, bastaría con sustituir dicho valor por el promedio del valor del dato anterior y del posterior.

Para un mejor análisis de los posibles errores en la forma descrita se recomienda hacer una gráfica mostrando la diferencia de caudal entre dos días consecutivos y mejor aún una gráfica con los incrementos relativos de caudal respecto al día anterior (Figura 4.1), donde se pueden apreciar esos incrementos bruscos de caudal. De esta forma se podrían identificar además de posibles errores de gran valor absoluto, errores no tan significativos o de menor cuantía pero que si se encuentran dentro de un rango de valores de caudales pequeños o próximos a cero, pueden suponer un incremento relativo muy importante y modificar los resultados en el proceso de cálculo.

Además del valor y el signo de las anomalías, también es importante el momento en el que se produzcan dentro del año hidrológico. Si se producen durante el periodo de caudales máximos o abundantes, lo más probable es que no influyan en el cálculo del  $Q_b$  ya que éste se basa en el estudio de la serie de mínimos. Por el contrario, si se producen durante el periodo de caudales mínimos o reducidos, pueden condicionar notablemente los resultados del método y habrá que actuar como se ha descrito anteriormente.

#### **4.1.2 EL AÑO HIDROBIOLÓGICO**

El mes en el que se inicien las series de datos anuales tiene importancia para el cálculo del  $Q_b$  y puede condicionar el resultado final, ya que si se empieza a mitad de un período de caudales mínimos, éste no quedaría correctamente representado en el cálculo de las medias móviles y por lo tanto podría dar lugar a un cálculo erróneo del  $Q_b$ . Esta circunstancia, aunque ya apuntada en el método original (Palau *et al.*, 1997), conviene incidir sobre ella y justificarla ya que en algunos foros de debate se ha criticado la validez de la metodología del Caudal Básico precisamente por una mala aplicación del método, al no considerar el año hidrobiológico en el estudio de las series de datos.

En este sentido, el año hidrológico en el Estado Español empieza en Octubre, por considerar que en Setiembre se produce la situación de máximo agotamiento de recursos hídricos en el país. Pero esta fecha no nos sirve como punto de corte entre las series de datos de dos años consecutivos ya que en el ambiente mediterráneo es muy frecuente encontrar ríos donde en el mes de Octubre se registre aún el final del periodo seco. El año natural, empezando en Enero, tampoco sirve de forma generalizada, ya que existen ríos, en este caso principalmente los de régimen nival, en cuyo hidrograma anual se registra un mínimo más o menos intenso y dilatado durante el invierno (retención del agua en la cuenca hidrográfica en forma de hielo y nieve). Aunque en muchos casos los mínimos de invierno no son ni tan dilatados ni tan pronunciados como los estivales, se trata de evitar de entrada, cualquier posible interferencia o distorsión en el cálculo del  $Q_b$ , de ahí que tampoco se haya utilizado la distribución de caudales del año natural como referencia apta para el método.

Para el cálculo del  $Q_b$  hay que empezar las series de datos diarios por un mes que no contenga el mínimo caudal medio diario anual, y que tampoco sea el mes con la media mensual de caudales medios diarios más baja. Por lo tanto, en esta metodología se establece como unidad de cálculo el “año hidrobiológico”, que se define como aquel que

empieza en un mes con caudales abundantes, es decir, que no contenga los mínimos caudales medios diarios anuales, y que como se verá más adelante va a corresponder con la estación del año de máxima actividad biológica (primavera).

Esta fecha de comienzo del año hidrobiológico puede y ha de ser, en principio, variable para cada tipo de río y habrá que especificarlo en el cálculo del Qb en función del análisis del hidrograma anual. El año hidrobiológico es por tanto una característica más del método del Qb, enfocada a la personalización de la gestión para cada río o tipo de río.

En la tabla 4.1 se muestra la frecuencia con que el mínimo caudal medio diario absoluto de cada año se ha encontrado en los distintos meses. Como se puede apreciar, los meses de Abril, Mayo y Junio son los meses donde menos veces se ha encontrado el mínimo caudal medio diario absoluto anual, y además los promedios de los mínimos caudales medios diarios de estos meses suelen ser los más altos. Parece lógico por tanto, escoger uno de ellos como el inicio del año hidrobiológico.

Teniendo en cuenta que el mes de Abril es en el que menos veces se ha encontrado el mínimo caudal medio diario absoluto anual se ha escogido este mes como la fecha de inicio del año hidrobiológico para el bloque de ríos estudiado. Este mes de inicio, en principio bastante adecuado para buena parte de los ríos peninsulares, coincide además con el inicio de la primavera y por tanto de la época de mayor actividad biológica, lo que constituye un valor añadido y aporta sentido a esta propuesta del año hidrobiológico. Este hecho queda refrendado en la sabiduría popular contenida en el refranero español (“en Abril aguas mil”).

Para ver el efecto que tiene el mes de inicio de las series de datos sobre el valor del Qb obtenido, se ha hecho un ejercicio tomando una muestra de 11 ríos de regímenes hidrológicos distintos en los que se ha calculado el Qb empezando en los diferentes meses del año. Estos 11 ríos incluyen ríos con un máximo de caudales en primavera (Carol, Segre1 y Tor), con un máximo de caudales en invierno (Arga, Jiloca y Erro), ríos con una gran variabilidad de caudales expresada como un coeficiente de variación alto (Onyar, Ridaura y Francolí) y ríos con una variabilidad de caudales baja (Segre1, Jiloca, Piedra y Barranco del Val). En la figura 4.2 se representa el porcentaje de variación del Qb calculado empezando por cada mes respecto al Qb del mes de Abril. Como se puede apreciar, empezar los años hidrobiológicos en los meses de Marzo o Mayo no suponen variaciones importantes en cuanto al Qb obtenido, mientras que si empezamos por cualquier otro mes, especialmente durante el periodo de estiaje (de Julio a Octubre), los Qb calculados experimentan variaciones importantes en la mayoría de los ríos que pueden llegar a ser más de 10 veces mayores (superiores al 1000% empezando en los meses de Agosto y Noviembre en el río Onyar). Por otro lado, no se ha encontrado ninguna diferencia entre la variación del Qb obtenido empezando las series de datos por distintos meses y la variabilidad de los caudales o tipo de hidrograma anual.

Para determinar el mes por el que empieza el año hidrobiológico en los ríos considerados en este estudio se ha analizado la frecuencia y la distribución de los meses que contienen el mínimo caudal medio diario anual sobre los datos disponibles en cada caso.

Tabla 4.1. Frecuencia con que se ha encontrado el mínimo caudal medio diario absoluto para cada año en los distintos meses.

RIO	EN	FE	MA	AB	MA	JN	JL	AG	SP	OC	NO	DI
Ega	-	-	-	-	-	-	-	5	2	3	-	-
Arga	-	-	-	-	-	-	3	-	2	4	1	-
Piedra	2	-	1	-	1	1	1	6	4	2	3	1
Jiloca	-	-	-	-	-	1	4	8	2	1	-	-
Carol	1	-	-	-	-	-	-	6	12	8	1	-
Segre (1)	1	-	-	-	-	-	-	1	5	2	1	1
Iregua	1	-	1	-	-	-	3	6	5	3	5	1
Cidacos	-	-	-	-	-	-	-	3	7	5	1	-
Deza	-	-	-	-	3	1	-	5	2	2	-	-
Salazar	-	-	-	-	-	-	-	1	6	3	-	-
Zadorra	1	-	-	-	-	-	1	9	3	-	-	-
Erro	-	-	-	-	-	-	1	4	5	6	2	1
Segre (2)	-	1	-	-	-	-	1	2	5	-	-	1
Bco. del Val	-	-	-	1	-	2	5	4	2	1	-	-
Alcanadre	-	-	-	-	-	-	1	2	5	4	3	1
Guadalopillo	-	-	-	-	-	2	2	4	4	3	-	-
Aguas Vivas	6	6	8	7	5	6	5	5	5	8	5	5
Noguera de Tor	2	1	2	-	-	-	-	1	1	1	1	1
Tor	7	4	4	-	-	-	1	3	8	6	5	3
Baliera	2	3	1	-	-	-	2	2	9	5	1	2
Lumbreras	-	-	-	-	-	-	1	4	7	4	1	-
Sallent	-	1	2	-	-	-	4	9	12	2	1	-
Ubagua	-	-	-	-	-	-	2	2	7	5	1	-
Cinqueta	6	5	4	-	-	-	1	2	5	3	3	2
Vallferrera	5	6	4	-	-	-	2	3	6	4	3	3
Nog. Ribag.	2	5	5	1	-	-	-	-	-	1	1	1
Sta. Magdalena	3	2	-	-	-	-	-	1	2	5	2	2
Anoia	-	-	-	1	-	1	1	5	1	1	-	-
Gaià	-	-	-	-	1	3	6	6	5	4	-	-
Fluvià	1	-	-	-	-	-	1	2	4	2	2	-
Onyar	-	-	-	-	1	1	5	9	6	4	2	1
Francolí	1	-	-	-	-	-	1	5	4	2	3	1
R. de Mediona	1	-	-	-	-	1	-	3	4	2	-	2
Ser	2	-	-	-	-	-	1	2	5	3	3	1
R. de Caldes	2	1	1	1	2	4	4	9	6	3	2	2
R. de Tenes	-	-	-	-	-	-	-	6	4	1	1	1
R. de Arbúcies	-	-	1	-	-	-	2	7	4	1	1	1
Brugent	2	-	-	-	1	1	2	4	3	4	3	1
Tordera	-	-	-	-	-	-	4	8	6	6	1	-
Ridaura	3	2	2	2	8	7	10	10	10	9	7	3
R. del Carme	-	1	1	-	-	-	-	1	6	2	-	2
R. de Rubí	1	-	-	1	1	-	1	5	-	1	-	-
Llobregat	3	-	-	1	-	-	-	-	2	1	1	2
<b>TOTAL</b>	<b>55</b>	<b>38</b>	<b>37</b>	<b>15</b>	<b>23</b>	<b>31</b>	<b>78</b>	<b>180</b>	<b>203</b>	<b>137</b>	<b>67</b>	<b>42</b>

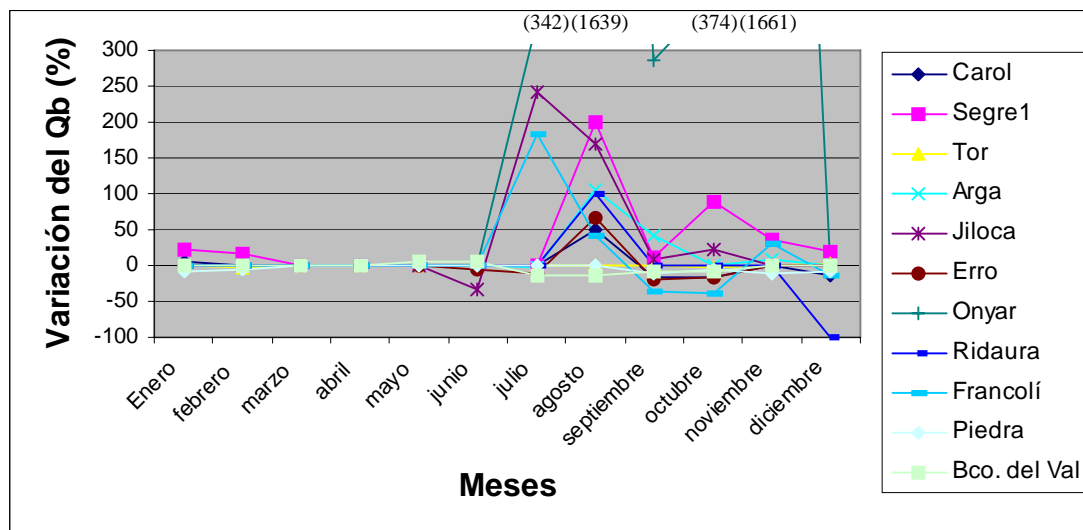


Figura 4.2. Variación del valor del  $Q_b$  calculado para 11 ríos empezando en los distintos meses del año respecto del valor calculado empezando en el mes de Abril.

Sánchez (2000) ha desarrollado un procedimiento que permite calcular el  $Q_b$  sin analizar las series de datos para ver dónde empezar a contar cada año. Este procedimiento consiste en completar la matriz de medias móviles utilizando para ello los caudales medios diarios del siguiente año, de forma que no queda cortado ningún periodo de mínimos al cambiar de año y se trabaja con una única matriz de medias móviles (Figura 4.3). Actuando así se obtienen los mismos resultados que utilizando el año “hidrobiológico” sin tener que definirlo, calculando el  $Q_b$  de una forma más rápida y sistemática aplicando medias móviles a los 3650 datos seguidos (365 x 10 años colocados consecutivamente), en lugar de hacerlo para cada año de forma independiente. Además, tiene la ventaja añadida de que no se desprecia ningún dato de la serie de caudales para el cálculo del  $Q_b$ , mientras que si se utiliza el año hidrobiológico habría que despreciar una serie de días del primer y último año de la serie en función del mes en que empiece dicho año hidrobiológico. No obstante, debido a que el método trata de ser lo más personalizado posible para cada río y para su correcta aplicación el gestor debe tomar una serie de decisiones basadas en el régimen hidrológico y características de la serie de caudales de cada río (por ejemplo determinar el número de años a considerar en el cálculo, como se verá en el siguiente apartado), se considera recomendable hacer el ejercicio de calcular el año hidrobiológico, puesto que por un lado recoge una base conceptual del método (permite encontrar los periodos de caudales mínimos), y por otro ayuda a conocer el régimen hidrológico de cada río.

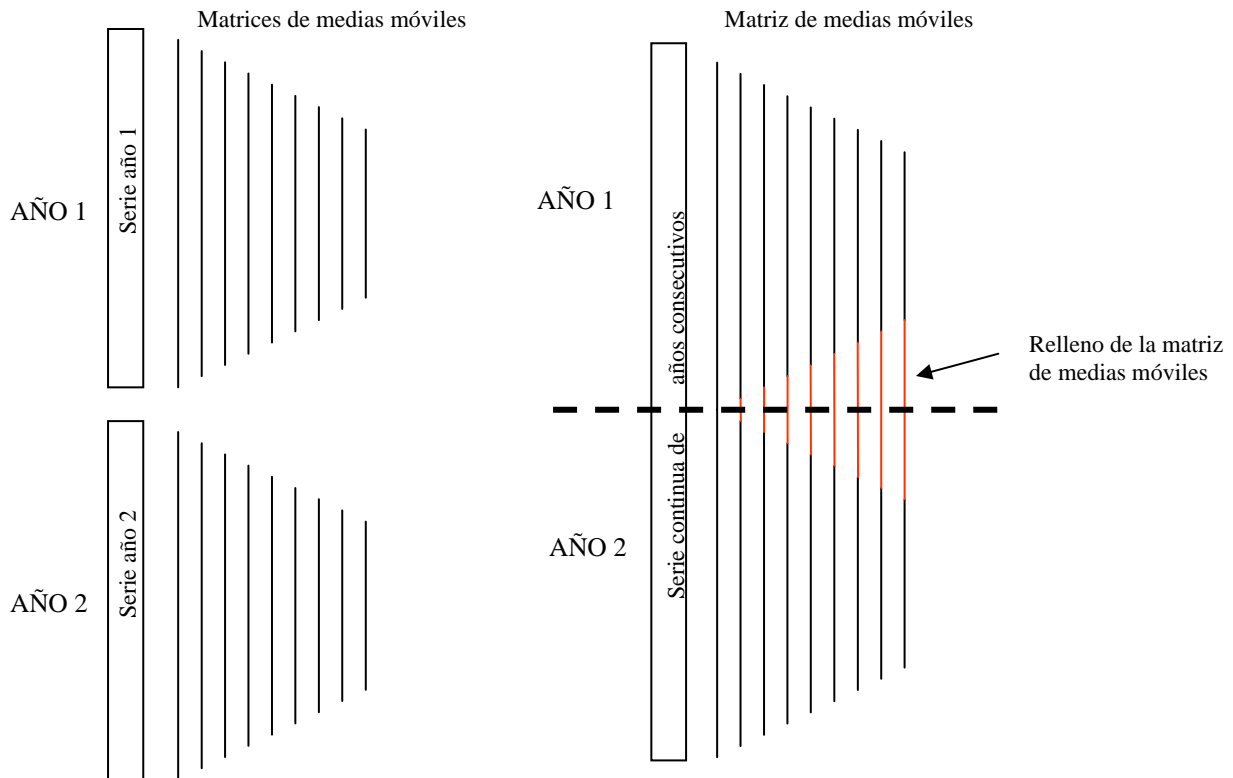


Figura 4.3. Procedimiento de cálculo de  $Q_b$  propuesto por Sánchez (2000) utilizando la serie continua de datos diarios para años consecutivos y completando la matriz de medias móviles. (Modificado de Sánchez, 2000).

#### 4.1.3 NÚMERO DE AÑOS CONSIDERADOS PARA EL CÁLCULO DE $Q_b$ Y SU VALIDEZ TEMPORAL

Al explicar el método, se ha expuesto que el período de años a considerar para realizar el cálculo del  $Q_b$  sea de 10. Esta cifra no se ha escogido al azar, sino que se ha deducido después de analizar cuál podría ser el periodo de años que, de forma general, cumpliera los siguientes tres requisitos:

- 1) Que se corresponda con el periodo de años dentro del cual, normalmente, el valor de  $Q_b$  se estabiliza.
- 2) Que sea lo suficientemente grande para recoger todas las variaciones o características ambientales que puedan haber condicionado directamente las comunidades actuales del ecosistema fluvial.
- 3) Que sea un periodo de años del que hay garantía de registros continuos y fiables en la mayor parte de la red de estaciones de aforo del estado.

Para ello, se han calculado los  $Q_b$  para distintos períodos de años empezando con el último registro (más reciente) y se han analizado las diferencias entre los  $Q_b$  calculados para los distintos períodos de tiempo ( $Q_{b_n}$ ) y los  $Q_b$  calculados para el período de 10

años que, de forma general, se recomienda ( $Q_{b10}$ ) (en Palau *et al.*, 1997, se pueden consultar más detalles sobre los cálculos realizados). En algunos ríos, el  $Q_{b10}$  no corresponde exactamente a un período de 10 años ya que sólo se disponía de una serie de datos correspondiente a 10 años hidrológicos (empezando en Octubre), y al tener que comenzar el año en el mes de Abril para el cómputo de  $Q_b$  según años hidrobiológicos, la serie se reducía a 9 años disponibles; en cualquier caso, este valor se ha considerado como el equivalente al  $Q_{b10}$  o valor de referencia.

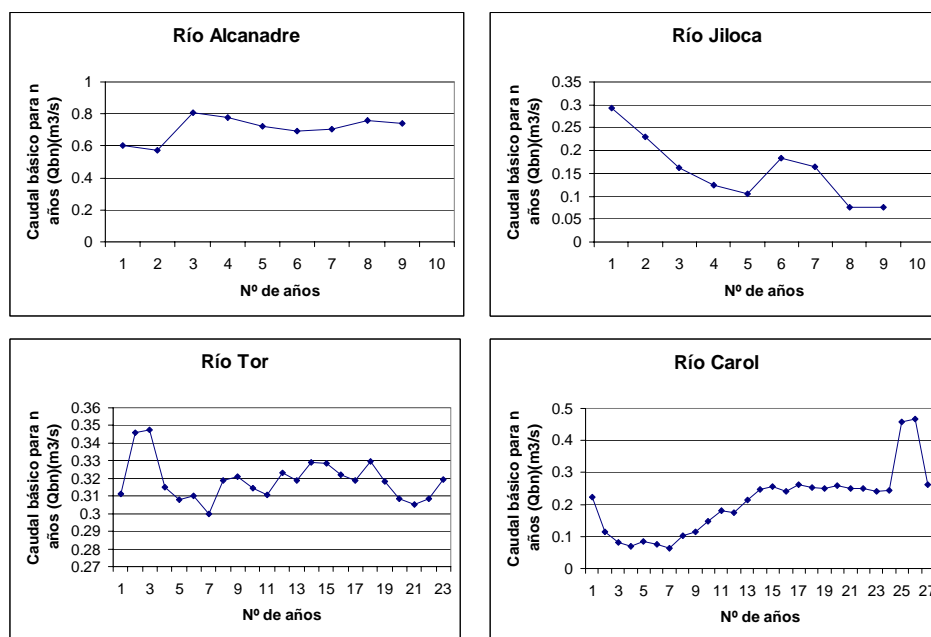


Figura 4.4. Ejemplos de comportamiento de los tipos de ríos 1a (Alcanadre), 1b (Jiloca), 1c (Tor) y 2a (Carol) en relación a la estabilización del valor de  $Q_b$  para distintos periodos de años.

Como se puede apreciar en la representación gráfica de los caudales calculados para distintos periodos de años (Figura 4.4), existen dos tipos de comportamiento, a su vez subdivididos en varios subtipos, en relación a la estabilización del valor de  $Q_b$  para un período de diez años:

- 1) Ríos con un valor de  $Q_b$  que se estabiliza para un número de años igual o inferior a diez:
  - a) Ríos cuyo  $Q_b$  se estabiliza claramente (río Alcanadre). Son los ríos que se ajustan, lógicamente, al criterio de considerar diez años como suficientes para el cálculo de  $Q_b$ .
  - b) Ríos cuyo  $Q_b$  se estabiliza aparentemente. Corresponde a ríos donde la estabilización o bien sólo se intuye a nivel de tendencia o bien se ve alterada por la presencia de valores extraordinarios de  $Q_b$  (años húmedos; río Jiloca). En estos casos, es recomendable tener en cuenta series más largas para comprobar que efectivamente la tendencia a la estabilización se cumple (los valores de  $Q_b$  son realmente extraordinarios) o bien que estos valores en principio considerados como extraordinarios son relativamente frecuentes y por tanto los ríos pasarían a ser del tipo 2b. En todos los ríos de tipo 1a y en

los de 1b que se estabilicen, se podría considerar un período menor de diez años para el cálculo de Qb.

- c) Ríos que a la vista de las gráficas su Qb no se estabiliza aparentemente nunca (río Tor), pero que si se miran los valores de estos Qb (eje de ordenadas) se puede ver que las diferencias son mínimas y por tanto se pueden considerar como valores estabilizados y entrar a formar parte del tipo 1a. De los 11 ríos encontrados con estas características, todos excepto 1 (Tor) pertenecen a la cuenca del Pirineo Oriental (son ríos mediterráneos).
- 2) Ríos con un Qb que no se estabiliza para un número de años igual o inferior a diez:
- a) Ríos cuyo Qb se estabiliza para un número de años superior a diez (río Carol). En estos ríos, los períodos considerados para el cálculo de Qb deberían ser mayores de diez años de forma que se obtenga un valor de Qb estabilizado y, por tanto, las revisiones de dicho cálculo se podrían espaciar más en el tiempo.
  - b) Ríos donde no existe un patrón aparente de tendencia a la estabilización del Qb. Estos ríos tendrían hidrogramas sujetos a ciclos o cambios en una escala de tiempo inferior a la de los ríos más continentales, de modo que su gestión debería ir encaminada a calcular el Qb sobre periodos de años cortos y a recalcularlo por tanto con más frecuencia.

Los 43 ríos estudiados se distribuyen en relación a los grupos descritos de la siguiente forma:

<u>Tipo de río</u>	<u>Cuenca del Ebro</u>	<u>Cuenca del Pirineo Oriental</u>
1a	16	3
1b	8	3
1c	1	10
2a	2	0
2b	0	0

Como se puede ver, el Qb de la mayoría de los ríos se estabiliza adecuadamente dentro de un período de diez años. Por otro lado, es significativo y a la vez coherente el hecho de que los ríos de la Cuenca del Ebro son mayoritariamente “más estables” (tipos 1a y 1b) que los de la Cuenca del Pirineo Oriental, donde su mayor carácter mediterráneo hace que sean mayoría los ríos de tipo 1c. No se ha encontrado ningún río cuyo Qb no se estabiliza nunca (tipo 2b) entre los 43 estudiados.

En líneas generales, a más estabilidad hidrológica menor es el número de años necesario para que Qb se estabilice, pero paradójicamente, cuanto más inestable es un río también menor es el número de años recomendable para calcular Qb. Por lo tanto, del análisis expuesto se deduce que el período de 10 años a considerar para el cálculo de Qb será válido para la mayoría de ríos (tipos 1a, 1b y 1c), aunque *habrá que estudiarlo en cada caso* ya que puede y debe variar en función de la torrencialidad del río, variabilidad de caudales u otra serie de circunstancias particulares. Por otro lado, diez años también cumple el requisito de ser el período de tiempo biológicamente importante para la mayoría de organismos acuáticos, para los que lo importante en su vida actual no es lo

que ocurrió hace 20, 30 o más años, sino lo del año pasado y de los anteriores más recientes, los caudales de los cuales son los que realmente han condicionado el meso y microambiente donde les ha tocado vivir.

En cuanto a la validez temporal de los resultados, ésta no debe exceder al número de años utilizado como periodo para el cálculo del Qb, procediéndose a recalcularlo dicho valor como máximo al finalizar el mismo para incorporar las posibles variaciones en el régimen hídrico de forma continua. La mayor o menor validez de los datos dependerá de nuevo de la torrencialidad del río, variabilidad de caudales u otra serie de circunstancias particulares, por lo que habrá que recalcularlo el Qb con una mayor frecuencia en ríos con una gran variabilidad que en ríos muy estables.

#### 4.1.4 PROCESO DE CÁLCULO DEL CAUDAL BÁSICO

Dentro del proceso de cálculo del Qb hay varios aspectos para los que merece la pena resaltar y justificar el criterio escogido en el método original (Palau, 1994) y que se comentan en los apartados siguientes.

##### Utilización de la media aritmética en el cálculo de medias móviles

El primero aspecto cuestionable es el hecho de utilizar las medias aritméticas tanto al aplicar las medias móviles como al realizar el promedio por columnas de la matriz de caudales mínimos definidos por las medias móviles (matriz 10x100 de la figura 2.1). Además de la media, existen otros estadísticos representativos de un conjunto de datos. Así, se podría haber escogido el valor más frecuente (moda), o el valor que deja al 50% de los restantes datos por encima y por debajo de él (mediana). Pero ante el reducido número de datos (normalmente diez en la matriz 10x100, uno por año), y el hecho de que muchos de los ríos peninsulares presenten períodos de tiempo más o menos persistentes y periódicos donde no circula caudal por los mismos además de estar sujetos a una notable variabilidad interanual, se escogió la media aritmética como estadístico central capaz de compensar mejor que la moda (tomaría normalmente el valor de cero o no existiría) y la mediana (no tendría en cuenta el peso de caudales extremos ni la citada variabilidad de los mismos y daría valores menores que la media).

Una vez descartadas la moda y la mediana, se puede plantear la cuestión sobre la utilización de otros descriptores de valores centrales además de la media aritmética (X) al aplicar las medias móviles, como pueden ser la media geométrica (G), armónica (H) o cuadrática (Q). Las fórmulas de cálculo son las siguientes:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad G = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n} \quad H = \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^n 1}{x_i}} \quad Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}}$$

Todos ellos son promedios o medidas de la tendencia central, es decir, se obtiene a través de ellos un número representativo del conjunto de datos de la distribución, aunque normalmente dan valores distintos. Existe una relación que liga las diferentes



medias a partir de las definiciones de las mismas que es la siguiente (Vizmanos y Asensio, 1976):

$$\text{armónica} \leq \text{geométrica} \leq \text{aritmética} \leq \text{cuadrática}$$

Esta misma relación se puede apreciar en la figura 4.5 donde se ha calculado el caudal básico para un río tomando distintos períodos de años para calcularlo utilizando las cuatro medias en su proceso de cálculo. Los valores de las cuatro medias serían iguales únicamente en el caso de que todos los valores del conjunto de datos sean iguales.

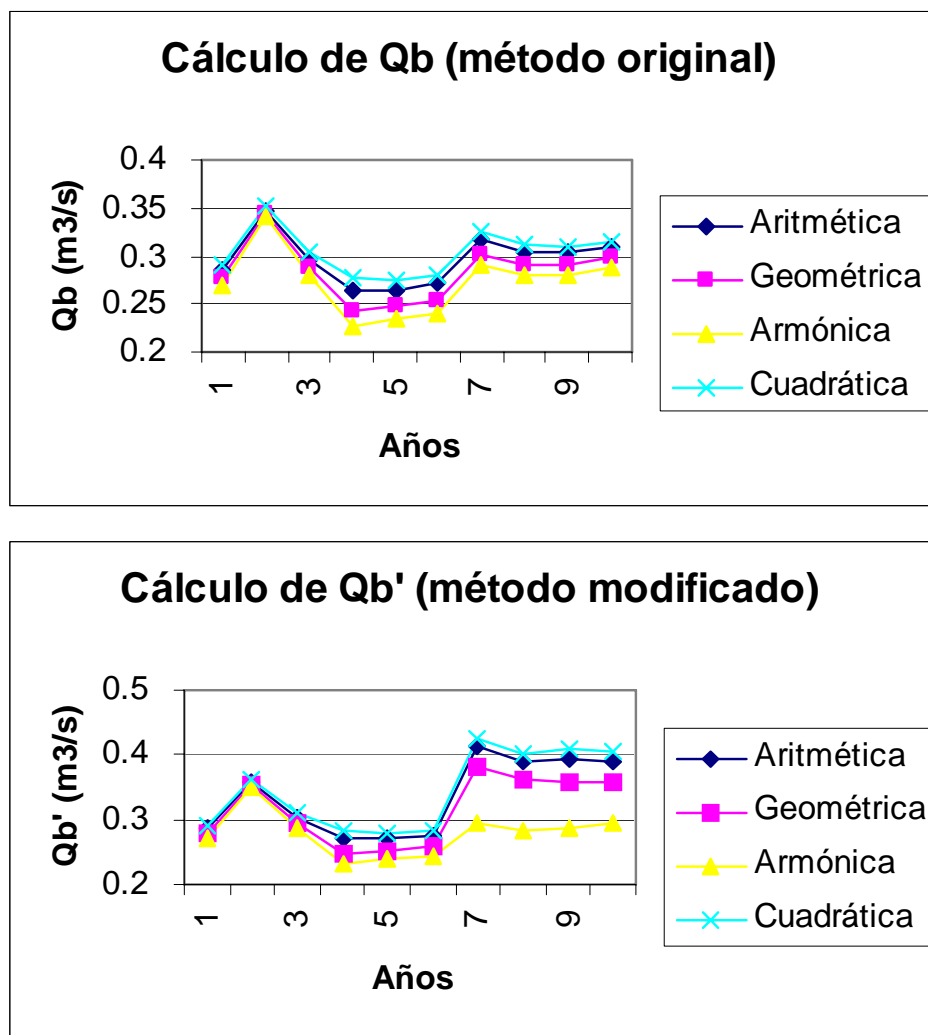


Figura 4.5. Ejemplo de Caudal Básico calculado utilizando la media aritmética, geométrica, armónica y cuadrática para el cálculo de las medias móviles a través de la formulación original y de la modificación a la misma comentada en el siguiente apartado.

Tanto la media geométrica como la armónica se suelen usar en el cálculo de valores relativos como números de índice, ratios y tasas medias, o cuando los valores representan medidas tomadas en el tiempo de una cantidad que aumenta en proporción constante (Hoel y Jessen, 1977); además, por su propio proceso de cálculo (raíz enésima del producto de los n valores) la media geométrica no tiene sentido usarla con valores de cero o próximos a cero, hecho que ocurre con bastante frecuencia al hablar de caudales medios diarios en ríos mediterráneos. Por otro lado, la media cuadrática, al elevar al cuadrado los valores a promediar, se ve muy afectada y es muy sensible frente

a valores extremos, por lo que no representaría tan bien como las otras medias las condiciones más frecuentes. Por todo ello, la opción más acertada parece ser la de utilizar la media aritmética ya que no es tan sensible frente a valores extremos como la cuadrática, es más conservadora (da valores de caudales mayores para el río) que la armónica, tiene unas propiedades que la hacen más sencilla a la hora de trabajar estadísticamente (ajustes de los valores a distribuciones, etc.), y es la que se suele utilizar en la aplicación de las medias móviles cuando se trata de ajustar una serie de datos que varía con el tiempo para ver la tendencia de dicha variación prescindiendo de las grandes fluctuaciones, como es el caso que nos ocupa (Ríos, 1985).

Como contrapartida, la media aritmética es relativamente sensible a observaciones atípicas y un error de datos o un valor anormal puede modificar el resultado en gran medida (Peña Sánchez de Rivera, 1993), por lo que habrá que asegurarse de que no existen este tipo de registros erróneos, es decir, de depurar el registro de datos, como se trató en el apartado 4.1.1.2.

### **Cálculo de un Qb para cada año y promediar frente al cálculo de un Qb para unas condiciones medias**

Una modificación del método que se ha planteado por el propio autor del mismo y que se utiliza actualmente es la posibilidad de calcular el Qb a partir de los incrementos relativos de cada año por separado y luego hacer la media de los diez Qb individuales (si es que se escoge un periodo de 10 años para su cálculo) para obtener el Qb final (Qb' de ahora en adelante), en vez de calcularlo como se ha explicado con anterioridad a partir de la media por columnas de la matriz de caudales mínimos definidos por las medias móviles (matriz 10x100 de la figura 2.1). Se ha procedido a calcular los Qb y Qb' (Caudales Básicos resultado de los dos procedimientos de cálculo) para comparar dichos valores obteniéndose los siguientes resultados:

- Al representar los valores de Qb frente a los de Qb' (Figura 4.6), se puede apreciar que se ajustan perfectamente a una recta ( $r^2 = 0.99$ ), con lo que se puede decir que los Qb predicen con bastante exactitud los valores Qb'.

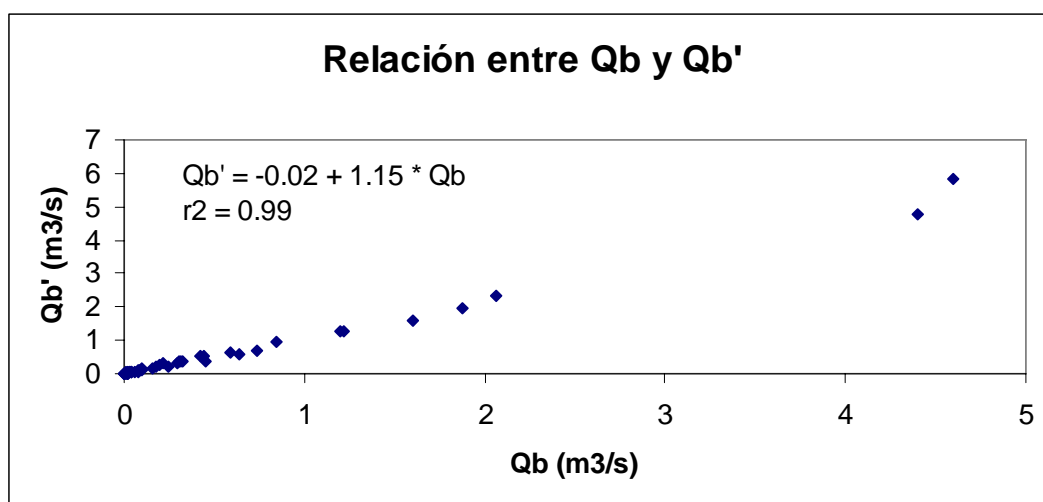


Figura 4.6. Relación entre los Caudales Básicos calculados por el método original (Qb) y el modificado (Qb').

- Del análisis de residuos (Figura 4.7) se deduce que para valores de caudales pequeños (menores de  $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$  aproximadamente), los valores de  $Q_b$  predicen los  $Q_b'$  por exceso, mientras que para valores mayores lo hacen por defecto.
- En general, los caudales  $Q_b'$  son mayores que  $Q_b$  (Figura 4.6), al tener la recta de ajuste una pendiente mayor de 1. Además, se ha comprobado que esa pendiente es distinta de 1, luego los valores  $Q_b$  y  $Q_b'$  no se pueden considerar estadísticamente iguales, es decir, que las dos formas de cálculo del Caudal Básico no dan los mismos valores siendo mayores los obtenidos por el método alternativo al propuesto.
- Se han relacionado los caudales calculados por ambos métodos ( $Q_b$  y  $Q_b'$ ) para distintos períodos de años con los caudales medios anuales y medios del período de estiaje (considerado como el mínimo caudal medio de tres meses consecutivos) del último año considerado así como de la media de los años considerados en cada período, sin encontrarse ninguna de las relaciones significativas, tanto para el conjunto de los 43 ríos como para los ríos tomados individualmente.

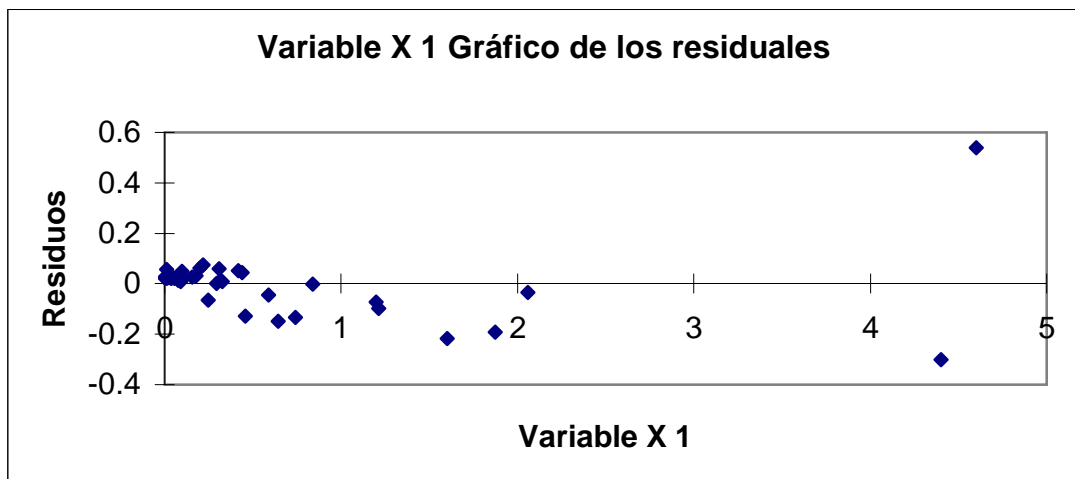


Figura 4.7. Gráfico de residuos del análisis de regresión entre  $Q_b$  y  $Q_b'$ .

Las ventajas y desventajas de esta alternativa (método modificado) sobre la propuesta (método original) son las siguientes:

- Calculando los  $Q_b$  individualmente para cada año y luego promediándolos se trabaja sobre datos de caudales reales y no sobre medias. Por su parte, en la metodología original al promediar los períodos de caudales mínimos para 1, 2, ... 100 días se están considerando unas condiciones medias y representativas del período considerado en cuanto a períodos de caudales mínimos, y sobre estas condiciones medias se aplica el concepto de cálculo utilizado (mayor incremento relativo entre dos valores consecutivos).
- Los Caudales Básicos obtenidos ( $Q_b'$ ) son en general mayores, lo cual es aparentemente bueno para el río (cuanta más agua se le deje al río mejor desde el punto de vista del ecosistema fluvial). Sin embargo, si se comprueba que con menos agua se garantizan las condiciones mínimas para mantener el ecosistema fluvial, este

exceso de agua sobre estas condiciones mínimas vendría en detrimento de otros usos del agua que corresponderían a los objetivos principales de la regulación del río (abastecimiento, riego, producción hidroeléctrica, etc.), además de suponer una imprecisión del método en cuanto a pérdida de eficacia en la gestión del agua para el ecosistema.

- Calculando los  $Q_b'$  ( $Q_b$  para cada año independiente) se obtiene una información adicional sobre las características hidrológicas de los años considerados en el periodo estudiado. De todas formas, esta ventaja quedaría compensada en el método original ya que para una correcta aplicación del método hay que hacer un estudio de la variación del  $Q_b$  considerando distintos periodos de años para encontrar el periodo en el cual se estabiliza este valor, así como un análisis de los hidrogramas anuales para determinar donde empieza el año hidrobiológico, por lo que ya se tiene *a priori* una información del régimen hidrológico intra e interanual relativamente exhaustiva.
- Al incorporar a la serie de cálculo un valor alto (ya sea por la incorporación de años muy húmedos con valores mayores de caudales o de años que sin ser muy húmedos sí tienen un estiaje con caudales circulantes superiores a la media),  $Q_b$  es más sensible (el pico es mayor), pero posteriormente vuelve más rápidamente a los valores normales (tendencia a lo largo del período) que el  $Q_b'$ , el cual no acusa *a priori* tanto la incorporación de ese año húmedo (el pico es menor), pero su efecto se mantiene durante todo el periodo considerado, es decir, enmascara en mayor medida los efectos de la variabilidad de caudales en el río (Figura 4.8).

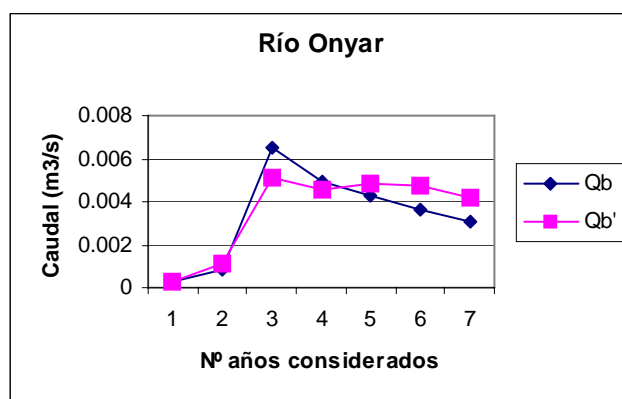


Figura 4.8. Ejemplo de la evolución del valor del Caudal Básico calculado para distintos periodos de años por el método original y el alternativo modificado al incorporarse un año con mayores caudales en la época de estiaje.

Por lo tanto, la alternativa de modificación del método da unos valores más conservadores para el río (el  $Q_b'$  es como media del orden del 23% superior al  $Q_b$ , representando unos porcentajes medios del 18,5% respecto al caudal medio interanual frente al 17% que representa el  $Q_b$ ; ver apartado 4.1.8) aunque el método original parece representar mejor los efectos sobre el ecosistema de variaciones en el régimen de caudales. A pesar de ello, ambos métodos dan unos resultados relativamente parecidos (pendiente de la recta de regresión próxima a 1 en figura 4.6).

#### 4.1.5 NÚMERO DE ORDEN DE LAS MEDIAS MÓVILES

En el cómputo del Qb, las medias móviles de los caudales medios diarios de cada año se han calculado con retardos crecientes comenzando en 1 hasta un máximo de 100.

Esta limitación responde a dos motivos, uno operativo y el otro lógico. Sobre el primero, se trata de agilizar al máximo el método, evitando cálculos innecesarios. Si se observa la tabla 4.2 se puede apreciar que los valores de Qb, se obtienen en todos los casos con retardos significativamente inferiores a 100.

Tabla 4.2. Número de orden de media móvil en el que se han encontrado los caudales básicos para los distintos ríos. (Nº ORD.: Número de Orden).

RÍO	Nº ORD	RÍO	Nº ORD.	RÍO	Nº ORD.	RÍO	Nº ORD.
Ega	2	Segre (2)	2	Ubagua	3	Ser	47
Arga	9	Bco. del Val	2	Cinqueta	2	R. Caldes	2
Piedra	2	Alcanadre	64	Vallferrera	2	R. Tenes	35
Jiloca	12	Guadalopillo	3	N. Ribagorzana	40	R. Arbúcies	2
Carol	3	Aguas Vivas	3	Sta. Magdalena	3	Brugent	37
Segre (1)	2	Noguera Tor	2	Anoia	50	Tordera	29
Iregua	2	Tor	2	Gaià	14	Ridaura	8
Cidacos	4	Baliera	2	Fluvià	5	R. Carme	2
Deza	3	Lumbreras	2	Onyar	47	R. Rubí	2
Salazar	3	Sallent	3	Francolí	3	Llobregat	14
Erro	3	Zadorra	2	R. Mediona	23		

Para el segundo, este valor máximo de orden 100, que corresponde a un promedio aplicado sobre un intervalo de 100 días consecutivos, se considera suficiente para contener los máximos períodos de estiaje de los ríos españoles, que normalmente no superan los tres meses (90 días). Los problemas de cálculo por el uso de un intervalo de orden 100 podrían existir en cauces que permanezcan secos durante más de tres meses consecutivos al año, si bien tales cauces difícilmente son catalogables como ríos en sentido estricto. Por lo tanto, este intervalo resulta más que suficiente para garantizar buenos resultados en el cálculo de Qb.

#### 4.1.6 TASA DE CAMBIO DE CAUDAL EN EL TIEMPO

En el apartado 2.2.6 se ha expuesto cómo calcular la tasa máxima de cambio de caudal, que como ya se apuntó representa un valor medio para el intervalo de caudales considerado. Pero para la aplicación de esta K calculada se debe generar un hidrograma de referencia donde se reflejen los cambios de caudal en el tiempo. Este hidrograma debe constar de una fase de ascenso y otra de descenso de caudales así como de un posterior ajuste de una ecuación logística que permita establecer, para cada intervalo deseado de caudales, los puntos intermedios de la curva. La aplicación de la K debe ser de forma gradual a lo largo del hidrograma y no en base a un valor constante.

La forma de este hidrograma o gradiente de cambio de caudales a adoptar puede ser de dos tipos: en escalones o en continuo. Para la elección de uno u otro tipo hay que tener en cuenta una serie de condicionantes técnicos y operativos de cada situación particular. Así, para el caso de desagües de fondo resulta en general desaconsejable someter los

dispositivos de cierre (compuertas, válvulas) a aperturas intermedias por el riesgo de cabitaciones, de modo que la regulación de caudales debe conseguirse mediante la apertura de uno o más dispositivos y por tanto sería de tipo escalonado. Hay que indicar que algunos de estos tipos de mecanismos de cierre, como es el caso de las compuertas, requieren tiempos considerables hasta la apertura total (hasta 25 minutos o más) lo que actúa en favor de impedir cambios excesivamente bruscos de caudal río abajo. En el caso de sueltas de agua a través de turbinas, la modulación de los caudales se consigue variando la apertura del distribuidor, operación que en el caso de que pueda programarse de forma automática, permite generar fácilmente curvas de crecida de tipo continuo. En caso contrario es mejor establecer escalones de cambio de caudal de cierta duración; es decir, una vez alcanzados unos determinados caudales preestablecidos, mantenerlos durante un cierto tiempo antes de proceder al siguiente cambio.

En el caso de la adopción de un hidrograma de tipo escalonado, se debe establecer una duración fija por escalón tal que combinada con la  $K$  aplicada a ese escalón, sea técnicamente operativa y dé un resultado que se ajuste a lo ambientalmente deseado. Como valor de referencia se puede tomar una duración mínima de 5-10 minutos por escalón, aunque ciertamente esta duración es arbitraria por lo que no hay ningún condicionante para no modificarla siempre y cuando no suponga cambios bruscos cuya tasa de cambio sea mayor que la  $K$  máxima calculada.

Existen una serie de criterios a tener en cuenta en el cálculo de las tasas de cambio de caudal para las fases de ascenso y descenso:

1) Criterios particulares de la fase de ascenso (tasa de cambio  $K_a$ ):

- La  $K_a$  debe oscilar entre el valor máximo calculado a través de la ecuación (2.2) y un valor mínimo próximo a 1,000. La variación del valor de  $K_a$  será gradual a lo largo de la fase de ascenso y función del número de escalones predefinidos, de tal forma que las  $K_a$  mayores se aplican a los caudales menores (inicio del ascenso), de modo que generen cambios relativos importantes, pero admisibles en valores absolutos. Por el contrario las  $K_a$  menores se aplican a la parte del hidrograma con caudales mayores (final del ascenso) para obtener una atenuación de los cambios y “advertir” en cierto sentido a las comunidades acuáticas sensibles (fauna) de que la variación de caudal termina.
- Hay que establecer en cada caso una tabla donde quede reflejado el número mínimo de escalones requeridos (y por lo tanto el tiempo mínimo requerido) para cada incremento de caudal. Existen algunas referencias sobre las tasas de cambio de caudal aconsejable en los ríos en función de la disminución de la altura de la lámina de agua (no debe ser mayor de 15 cm en 6 horas; Tennant, 1976) o del caudal circulante (tabla 4.3; 5% por minuto, fijado en la legislación de Castilla y León aunque actualmente no está vigente), pero en general carecen de una base sólida y un fundamento científico en el que apoyarse. Así pues, el ajuste de esta tabla dependerá en cada caso de las características geométricas y biológicas de la sección y tramo de que se trate. Como ejemplo, puede servir de referencia la tabla 4.4 elaborada para el río Genil, aguas debajo de la presa de Iznájar (provincia de Córdoba).

Tabla 4.3. Ejemplo de máximos cambios permitidos de caudal (de Bauersfeld, 1978, citado por Cushman, 1985).

Caudal de partida (m <sup>3</sup> /s)	Máximo cambio permitido en 30 minutos (m <sup>3</sup> /s)
60-80	5
80-110	10
110-160	17
160-210	21
210-280	27

2) Criterios particulares de la fase de descenso (tasa de cambio Kd):

- La Kd debe oscilar entre el valor mínimo calculado por la ecuación 2.2 y un valor máximo próximo a 1,000. La variación del valor de Kd será gradual a lo largo de la fase de ascenso y función del número de escalones predefinidos, de tal forma que las Kd menores se aplican a la parte del hidrograma con caudales mayores (inicio del descenso) de modo que generen cambios reducidos. Esto se explica por la existencia de un mayor riesgo de que los peces queden atrapados en pozas o charcos al disminuir el caudal rápidamente (hay menor tiempo de escape), especialmente cuando se parte de grandes caudales iniciales (se inundan zonas que normalmente no lo están y que pueden proporcionar numerosas pozas), cuando se parte de caudales muy bajos (en seguida se crean mayor número de depresiones donde pueden quedar atrapados los peces) o cuando se realiza por la noche (les resulta a los peces más difícil el escapar de quedar atrapados) (Becker *et al.*, 1981, citado en Cushman, 1985). Por el contrario, las Kd mayores se aplican al final de la curva a los caudales menores generando cambios relativos importantes, pero admisibles en valores absolutos.
- Hay que establecer una tabla para obtener la duración total y el número de escalones de la fase de descenso similar a la de la fase de ascenso, pero en este caso la duración total de la fase de descenso entre dos caudales cualquiera debe ser significativamente superior a la de ascenso, por el tipo de riesgo asociado mencionado anteriormente. Como ejemplo, puede servir de referencia la tabla 4.5 elaborada para el mismo caso del río Genil.

Estos criterios se concretan en las siguientes expresiones, de aplicación general, derivados de la Teoría Ecológica y, en particular, de la dinámica de poblaciones (Margalef, 1977; Krebs, 1986):

$$Q_t = \frac{Q_{final}}{1 + e^{a-rt}} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

para

$$r = \frac{a - \ln\left(\frac{1}{b} - 1\right)}{T_{total}} \quad \text{y} \quad a = \ln\left(\frac{Q_{final}}{Q_{inicial}} - 1\right)$$

donde “ $Q_t$ ” es el caudal en un tiempo intermedio  $t$ ;  $b$  es un valor ajustable próximo a 1; y “ $Q_{inicial}$  y  $Q_{final}$ ” son respectivamente los caudales de partida y final al que se quiere llegar.

***Ejemplo de caso práctico: establecimiento de la tasa de cambio de caudales en la presa de Iznájar, río Genil (Córdoba)***

Para entender mejor la aplicación práctica de esta tasa de cambio, se va a calcular para un caso concreto, el del río Genil, afluente del río Guadalquivir, aguas abajo de la presa de Iznájar (provincia de Córdoba), sometido a una marcada regulación de caudales de tipo mixto entre el abastecimiento de riegos y la producción hidroeléctrica (Palau y Alcázar, 1999). El Caudal Básico calculado a partir del régimen de caudales naturales fue de 1.5714 m<sup>3</sup>/s, y las tasas máximas de cambio de caudal por unidad de tiempo calculadas fueron 1.118 y 0.901 para la fase de ascenso y descenso de caudales respectivamente. Este tramo está sometido a crecidas ordinarias del orden de 125-135 m<sup>3</sup>/s que corresponden a sueltas desde el embalse de cierta entidad que responden a crecidas naturales y que son frecuentes hacia finales de invierno (febrero). Además, dentro de este intervalo de caudales estarían los considerados como caudales más frecuentes relacionados con el suministro de aguas para riego, cifrados en unos 55-60 m<sup>3</sup>/s en plena campaña, y en unos 16 m<sup>3</sup>/s en el resto del año. Así pues, se trata de establecer una curva de ascenso y otra de descenso de caudales entre el Caudal Básico y las crecidas ordinarias, partiendo de las tablas 4.4 y 4.5 que nos dan la duración total del ascenso y descenso entre los dos caudales (75 y 105 minutos respectivamente).

*Tabla 4.4. Duración mínima requerida y número de escalones de 5 minutos para incrementos de caudal en el río Genil aguas debajo de la presa de Iznájar.*

Diferencias de caudal (m <sup>3</sup> /s)	Número de escalones	Tiempo mínimo requerido (minutos)
10	4	20
20	6	30
40	8	40
60	9	45
80	10	50
100	12	60
120	14	70
140	15	75

*Tabla 4.5. Duración mínima requerida y número de escalones de 5 minutos para reducciones de caudal en el río Genil aguas debajo de la presa de Iznájar.*

Diferencias de caudal (m <sup>3</sup> /s)	Número de escalones	Tiempo mínimo requerido (minutos)
10	5	30
20	7	35
40	9	45
60	11	55
80	12	60
100	14	70
120	16	80
140	21	105



Aplicando la ecuación (4.1) se obtienen las tablas 4.6 y 4.7 donde se muestra, tanto para la fase de ascenso como para la de descenso, el escalonado de caudales dentro de todo el intervalo máximo ordinario de variación para el ejemplo propuesto.

*Tabla 4.6. Escalado de caudales y valores de Ka para la fase de ascenso para un cambio de caudal de 1.5 m<sup>3</sup>/s (Caudal Básico) a 130 m<sup>3</sup>/s.*

Escalón	Tiempo (minutos)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
0		1.5714
1	5	2.5523
2	5	4.1265
3	5	6.6232
4	5	10.5091
5	5	16.3840
6	5	24.8866
7	5	36.4458
8	5	50.8925
9	5	67.1633
10	5	83.4733
11	5	98.0209
12	5	109.7059
13	5	118.3266
14	5	124.2959
15	5	128.2500

En promedio, los incrementos relativos de caudal entre escalones, expresados en tanto por ciento para todo el intervalo de caudales ordinarios en ascenso y descenso se sitúa alrededor del 4,8 %, con un 7,2% de media para la fase de ascenso (entre 12,5% y 0,6%) y un 2,4% de media para la fase de descenso (entre 0,1% y 6,0%). Estos resultados son en principio biológicamente asumibles, al menos en relación con algunas experiencias analizadas en otros estudios (Irvine, 1984; Rimmer, 1985; Heggenes, 1988).

*Tabla 4.7. Escalado de caudales y valores de Ka para la fase de descenso para un cambio de caudal de 130 m<sup>3</sup>/s a 1.5 m<sup>3</sup>/s (Caudal Básico).*

Escalón	Tiempo (minutos)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
0		133.4286
1	5	132.6144
2	5	131.3898
3	5	129.5624
4	5	126.8671
5	5	122.9601
6	5	117.4360

Tabla 4.7. Escalado de caudales y valores de  $K_a$  para la fase de descenso para un cambio de caudal de  $130 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$  (Caudal Básico)(Cont.)

Escalón	Tiempo (minutos)	Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
7	5	109.8949
8	5	100.0787
9	5	88.0636
10	5	74.4172
11	5	60.1743
12	5	46.5622
13	5	34.6053
14	5	24.8559
15	5	17.3778
16	5	11.9063
17	5	8.0398
18	5	5.3741
19	5	3.5674
20	5	2.3571
21	5	1.5525

Las figuras 4.9 y 4.10 muestran las curvas tipo resultantes a partir de los valores de las tablas 4.6 y 4.7, observándose el efecto deseado en relación con la necesaria atenuación indicada para los momentos iniciales y finales de cada periodo de cambio así como la distinta duración de las dos fases.

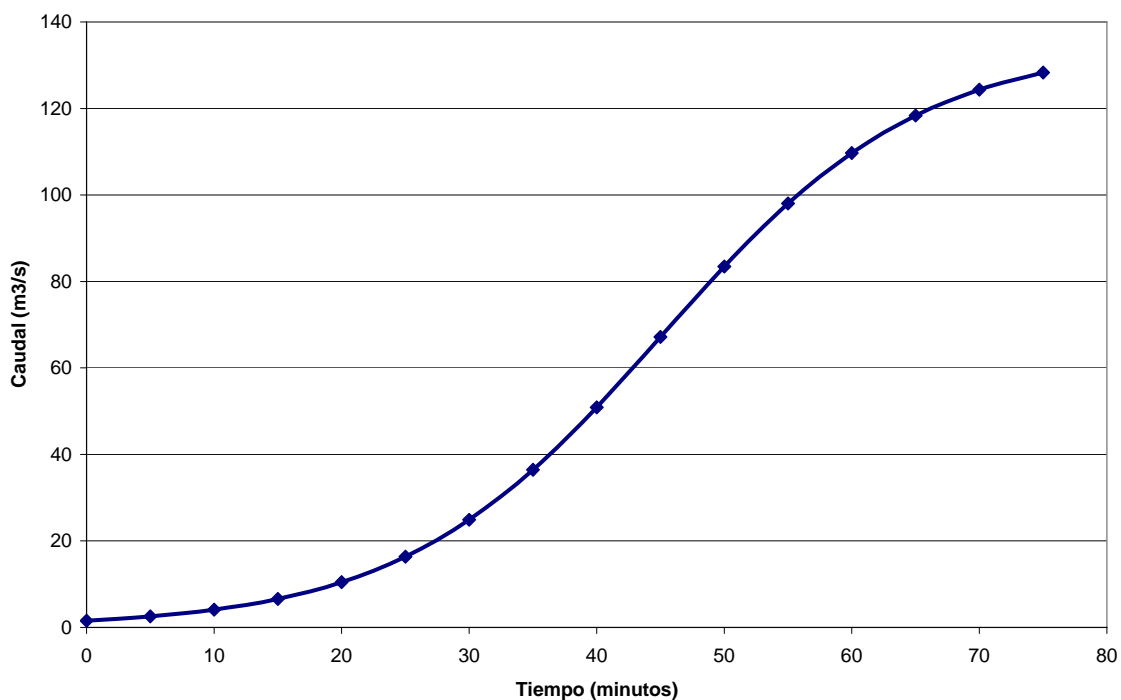


Figura 4.9. Curva de ascenso para el intervalo máximo ordinario de cambio de caudal aguas debajo de la presa de Iznájar, de acuerdo con los criterios indicados en el texto.

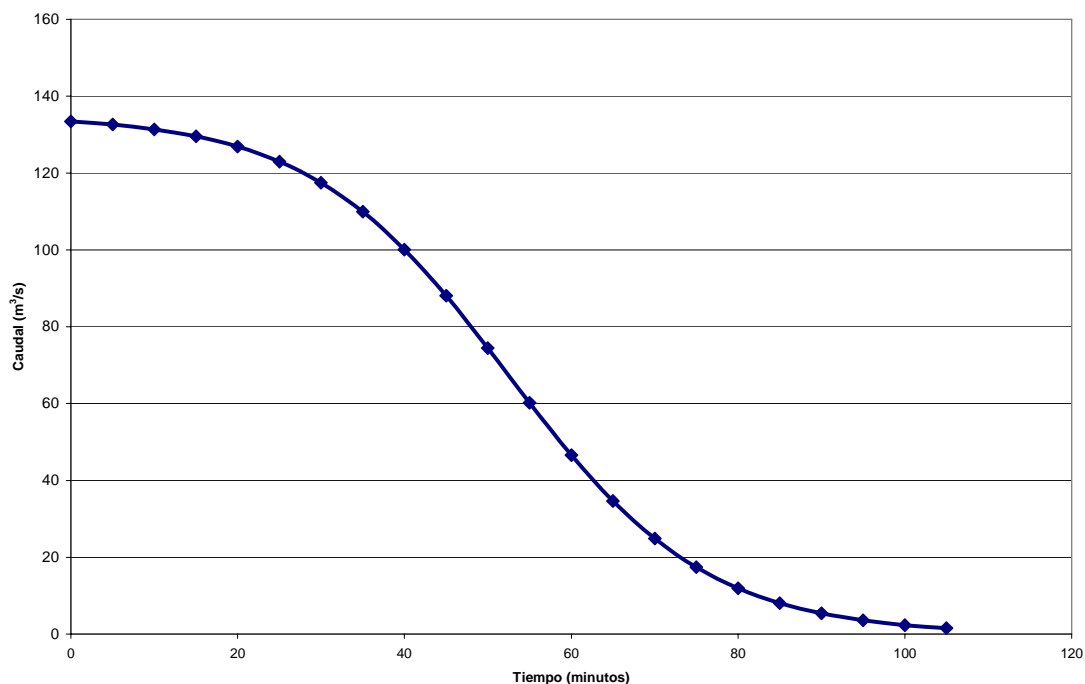


Figura 4.10. Curva de descenso para el intervalo máximo ordinario de cambio de caudal aguas debajo de la presa de Iznájar, de acuerdo con los criterios indicados en el texto.

#### 4.1.7 EL CAUDAL DE MANTENIMIENTO

Para proporcionar una variabilidad temporal al Caudal Básico similar al régimen natural de caudales y obtener así un régimen de caudales de mantenimiento, como ya se describió en el apartado 2.2.3, el método propone multiplicar al  $Q_b$  (o en su caso el  $Q_b$  más el caudal de acondicionamiento) por un factor de corrección (ecuación 2.2).

Estos caudales de mantenimiento se han comparado con los obtenidos a partir de un análisis de series temporales de los caudales medios diarios, en el cual al separar la tendencia de la componente estacional se vio que de los 43 ríos, únicamente 32 presentaron una componente estacional estadísticamente marcada, no encontrándose un modelo de predicción para la variabilidad temporal de los 11 ríos restantes y por lo tanto no pudiéndose determinar los caudales de mantenimiento para estos ríos mediante esta metodología.

Si analizamos los caudales de mantenimiento obtenidos aplicando ambos procedimientos (Figura 4.11), vemos que los obtenidos a partir de la propuesta del método del Caudal Básico (ecuación 2.2) ( $Q_{mt}$ ) siguen una distribución temporal similar a los obtenidos a través del análisis de series temporales ( $Q_{mt}'$ ). Sin embargo, se puede apreciar que la curva de  $Q_{mt}$  se encuentra más atenuada que la de  $Q_{mt}'$ , es decir, los caudales de mantenimiento calculados por la metodología del Caudal Básico son en general iguales o menores que los obtenidos dando una variabilidad temporal a través de

un análisis de series temporales. Esta reducción de valores era de esperar ya que este es el efecto que precisamente se quería conseguir al introducir la raíz cuadrada en la ecuación 2.2. En concreto, para una muestra de 11 ríos escogidos al azar entre los que presentaron una componente estacional marcada, los  $Q_{mt}$  representaron como media aproximadamente el 30% del caudal medio interanual (variando entre el 18% y el 56%), mientras que los  $Q_{mt}'$  representaron aproximadamente el 50%, llegando en algún caso (río Cinqueta) a representar el 81% del caudal medio interanual, valor que *a priori* parece excesivo para un caudal mínimo de mantenimiento y puede dar lugar a problemas de compatibilidad con otros usos del agua.

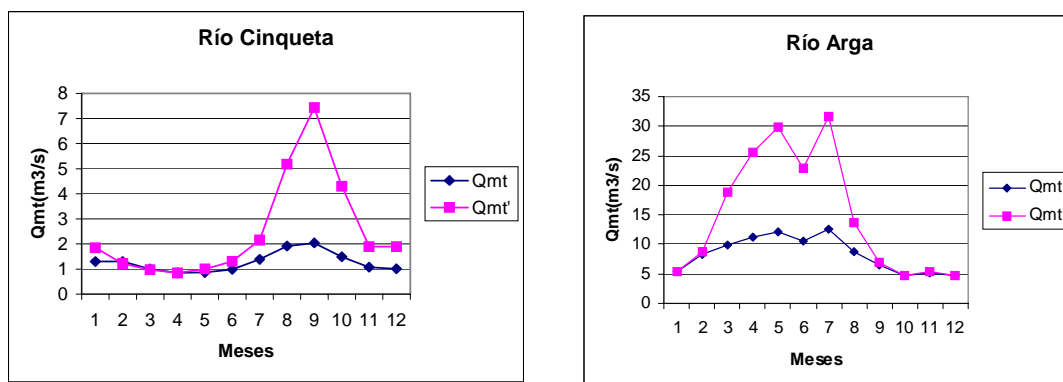


Figura 4.11. Ejemplo de caudales de mantenimiento para dos ríos calculado por el método del Caudal Básico ( $Q_{mt}$ ) y por análisis de series temporales ( $Q_{mt}'$ ).

En resumen, se puede decir que el método del Caudal Básico propone unos caudales de mantenimiento que siguen una distribución temporal análoga al régimen natural, obteniéndose unos resultados con patrones de variación similares a los obtenidos por técnicas estadísticas más complejas (análisis de series temporales). Además, estos caudales de mantenimiento propuestos están atenuados de forma que no dan valores excesivos para el río “a escala” que se quiere crear, con unas características de cauce y ribera acordes al régimen de caudales de mantenimiento que se propone.

#### 4.1.8 SIGNIFICACIÓN HIDROLÓGICA DEL CAUDAL BÁSICO

La tabla 4.8 muestra los caudales básicos calculados para cada tramo de río, así como algunos parámetros hidrológicos que se utilizan para evaluar e interpretar los valores de  $Q_b$  obtenidos. En conjunto, el valor medio de  $Q_b$  para los ríos estudiados es del 17% respecto al módulo interanual, variando entre algo menos del 1% y el 50% aproximadamente, con el 67% de los casos situado entre el 5% y el 30% según se muestra a continuación:

<u>Intervalo (%)</u>	<u>Nº ríos</u>	<u>Intervalo (%)</u>	<u>Nº ríos</u>	<u>Intervalo (%)</u>	<u>Nº ríos</u>
0-5	8	20-25	4	40-45	0
5-10	7	25-30	4	45-50	2
10-15	7	30-35	1	50-55	1
15-20	7	35-40	2	>55	0

El porcentaje máximo de  $Q_b$  respecto al caudal medio interanual corresponde al río Piedra que, como se puede apreciar en la tabla 4.8, presenta poca variabilidad a lo largo de la serie de caudales medios diarios (coeficiente de variación mínimo) y por lo tanto la comunidad acuática no está acostumbrada a largos períodos de caudales muy pequeños o, en todo

caso, muy distintos de los valores medios.

Tabla 4.8. Caudal básico y su relación con otros parámetros hidrológicos calculados en el presente estudio. (*Q<sub>b</sub>*: caudal básico; *Q<sub>a</sub>*: caudal medio interanual; *C.V.*: coeficiente de variación de la serie de caudales medios diarios; *Desv. Stan.*: desviación estándar de la serie de caudales medios diarios; *Q<sub>min</sub>*: mínimo absoluto de la serie de caudales medios diarios; *Q<sub>max</sub>*: máximo absoluto de la serie de caudales medio diarios; *Q clasif.*: caudales clasificados; *Q + frecuente*: intervalo de caudales más frecuentes).

Estación	Q <sub>b</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>a</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>b</sub> /Q <sub>a</sub> (%)	C.V.	Desv. Stan.	Q <sub>min</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Caudal + frecuente	% días	Q clasif < Q <sub>b</sub>
Ega	1,21	10,00	12,14	129,28	12,93	0,29	200,75	2-4	7	Q <sub>339</sub>
Arga	4,60	44,82	10,26	136,48	61,18	2,56	703,5	0-8,96	2	Q <sub>356</sub>
Piedra	0,59	1,17	50,21	50,80	0,60	0,14	13,91	0,94-1,17	7	Q <sub>341</sub>
Jiloca	0,08	1,66	4,51	93,64	1,56	0,01	13,71	0-0,33	9	Q <sub>333</sub>
Carol	0,25	2,95	8,39	136,16	4,02	0,00	38,03	0,6-1,2	6	Q <sub>344</sub>
Segre (1)	2,06	14,66	14,05	91,00	13,34	0,26	177,85	5,86-8,80	5	Q <sub>345</sub>
Iregua	0,16	2,05	7,70	168,01	3,44	0,00	44,47	0-0,41	1	Q <sub>361</sub>
Cidacos	0,04	1,16	3,45	177,84	2,06	0,00	25,75	0-0,23	6	Q <sub>344</sub>
Deza	0,03	0,17	18,50	97,19	0,17	0,001	4,01	0,17-0,2	7	Q <sub>338</sub>
Salazar	0,22	8,54	2,57	202,43	17,29	0,13	265,4	0-1,71	5	Q <sub>348</sub>
Zadorra	1,87	10,62	17,64	180,59	19,17	0,44	457,4	2,12-4,25	5	Q <sub>347</sub>
Erro	0,20	3,69	5,42	177,23	6,55	0,00	75,93	0-0,74	6	Q <sub>342</sub>
Segre (2)	4,40	22,97	19,16	87,61	20,12	0,72	310,22	9,20-13,78	2	Q <sub>358</sub>
Bco. del Val	0,03	0,18	18,70	69,16	0,13	0,01	1,75	0,07-0,11	3	Q <sub>353</sub>
Alcanadre	0,74	3,47	21,34	149,91	5,20	0,38	75,96	0,69-1,39	18	Q <sub>298</sub>
Guadalopillo	0,04	0,14	25,88	118,35	0,17	0,01	3,07	0,03-0,06	16	Q <sub>307</sub>
Aguas Vivas	0,003	0,01	28,47	381,96	0,05	0,002	1,28	0,004-0,006	2	Q <sub>358</sub>
Nog. de Tor	1,20	6,35	18,83	91,75	5,83	0,08	51,92	1,27-2,54	2	Q <sub>357</sub>
Tor	0,31	1,35	23,27	160,10	2,16	0,03	39,5	0,27-0,54	4	Q <sub>350</sub>
Baliera	0,31	1,59	19,38	118,65	1,89	0,04	44,47	0,64-0,95	2	Q <sub>358</sub>
Lumbreras	0,02	1,49	1,25	127,39	1,90	0,00	16,62	0-0,3	3	Q <sub>354</sub>
Sallent	0,04	0,33	13,03	130,72	0,43	0,00	7,04	0,07-0,13	10	Q <sub>327</sub>
Ubagua	0,18	2,68	6,69	169,39	4,54	0,06	37,21	0-0,54	7	Q <sub>338</sub>
Cinqueta	0,84	3,07	27,37	92,00	2,82	0,46	47,95	1,23-1,84	5	Q <sub>346</sub>
Vallferrera	0,29	0,76	38,54	114,41	0,87	0,03	11,43	0,3-0,46	12	Q <sub>322</sub>
N. Ribagorz.	0,46	1,65	27,70	90,56	1,49	0,00	13,55	0,66-0,99	8	Q <sub>335</sub>
St. Magdalena	0,33	2,28	14,41	189,23	4,31	0,05	70,59	0,46-0,91	1	Q <sub>362</sub>
Anoia	0,64	1,29	49,78	178,16	2,30	0,10	70,48	0,5-0,75	24	Q <sub>278</sub>
Gaià	0,02	0,25	6,05	243,18	0,60	0,00	21	0,05-0,1	11	Q <sub>325</sub>
Fluvià	1,60	7,22	22,18	241,92	17,47	1,00	430	1,44-2,88	9	Q <sub>332</sub>
Onyar	0,003	1,55	0,20	666,49	10,35	0,00	400	0-0,31	9	Q <sub>331</sub>
Francolí	0,04	0,33	10,52	477,44	1,57	0,00	90	0-0,07	9	Q <sub>333</sub>
R. de Mediona	0,09	0,20	45,64	116,18	0,23	0,06	5,54	0,08-0,12	13	Q <sub>318</sub>
Ser	0,10	1,47	6,76	439,83	6,44	0,00	210	0-0,29	7	Q <sub>340</sub>
R. de Caldes	0,01	0,20	6,00	311,11	0,63	0,00	14,9	0-0,04	16	Q <sub>306</sub>
R. de Tenes	0,02	0,39	4,83	218,54	0,86	0,00	18	0-0,08	12	Q <sub>322</sub>
R. de Arbúcies	0,10	0,76	12,46	254,10	1,94	0,00	65	0-0,15	7	Q <sub>341</sub>
Brugent	0,06	0,36	15,58	315,63	1,13	0,027	23,2	0,07-0,14	15	Q <sub>311</sub>
Tordera	0,01	5,58	0,22	391,76	21,85	0,00	690	0-1,12	8	Q <sub>334</sub>
Ridaura	0,001	0,12	0,93	604,76	0,73	0,00	30	0	40	Q <sub>219</sub>
R. del Carme	0,08	0,35	23,49	107,56	0,38	0,039	12	0,21-0,28	6	Q <sub>342</sub>
R. de Rubí	0,42	1,19	35,28	131,53	1,56	0,00	80	0,95-1,19	1	Q <sub>363</sub>
Llobregat	0,44	1,35	32,52	99,44	1,34	0,23	20	0,54-0,81	4	Q <sub>352</sub>

Por el contrario, el valor mínimo de este porcentaje corresponde a los ríos Onyar, Tordera y Ridaura, los cuales muestran una gran variabilidad de caudales a lo largo del tiempo (coeficientes de variación muy altos) permaneciendo secos una parte del año (es la situación más frecuente por ejemplo en el Ridaura). Por lo tanto, las comunidades que

habitan en estos ríos están formadas sin duda por especies que han evolucionado hacia adaptaciones a caudales muy bajos y épocas de sequía.

Por otro lado, los  $Q_b$  se corresponden con caudales clasificados que oscilan entre el  $Q_{219}$  (río Ridaura) y el  $Q_{363}$  (riera de Rubí), ríos que presentan bastante irregularidad, aunque la mayoría (44%) se encuentran entre el  $Q_{330}$  y el  $Q_{347}$ , es decir, entre los caudales que son igualados o superados el 90% y 95% de los días respectivamente, porcentajes ambos que son un referente para otras propuestas metodológicas de cálculo de caudales mínimos. En los ríos de la cuenca del Pirineo Oriental, en general, los  $Q_b$  representan unos caudales clasificados más conservadores (aproximadamente el  $Q_{321}$  en promedio) que en la cuenca del Ebro (aproximadamente el  $Q_{343}$ ), ya que los ríos del Pirineo Oriental son marcadamente mediterráneos, muy estacionales y con muchos períodos de caudales nulos, con lo que el porcentaje de días en los que el  $Q_b$  es igualado o superado es menor.

Como se recoge en la misma tabla 4.8, en la mayoría de los casos (51%) los  $Q_b$  superan o se encuentran dentro del intervalo de caudales más frecuentes. Estos intervalos de caudales se han establecido en base a intervalos equivalentes al 20% del caudal medio, ya que ese es aproximadamente el porcentaje medio que representa el  $Q_b$  respecto al caudal medio en todos los ríos analizados.

Por lo tanto, de estos aspectos se puede concluir que los  $Q_b$  propuestos no suponen condiciones extremas ni poco frecuentes en los ríos analizados. Además, no hay que olvidar que estos  $Q_b$  son los caudales mínimos del régimen de caudales de mantenimiento, y que por tanto los caudales que circularían por el río serían normalmente mayores, bien sea por la adición de un caudal de acondicionamiento (si es el caso) o por la aplicación del coeficiente de variabilidad temporal (lo que correspondería al Caudal de Mantenimiento). Por debajo del  $Q_b$  sólo se descendería en períodos de estiaje donde los caudales naturales sean nulos o inferiores al propio  $Q_b$ .

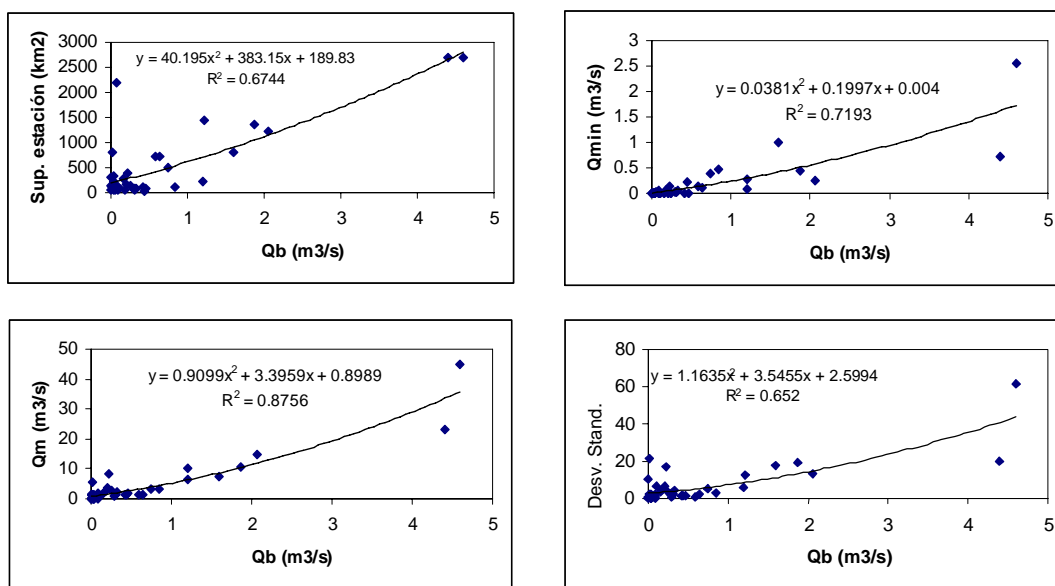


Figura 4.12. Relación entre el Caudal básico ( $Q_b$ ) y el caudal medio interanual ( $Q_m$ ), caudal mínimo ( $Q_{min}$ ) superficie de la cuenca vertiente y la desviación estándar de los caudales medios diarios.

Al relacionar los  $Q_b$  con los distintos parámetros hidrológicos, vemos que los  $Q_b$

umentan significativamente con el caudal medio interanual ( $r^2 = 0,87$ ) y la superficie de la cuenca vertiente para la sección de control estudiada ( $r^2 = 0,67$ ) (Figura 4.12). Como era de esperar, ríos con caudales medios altos deben tener caudales básicos altos para mantener la estabilidad del ecosistema acuático.

También se ha encontrado una relación significativa del  $Q_b$  con la desviación estándar ( $r^2 = 0,65$ ), lo que indica que a mayor heterogeneidad en la distribución de los caudales medios diarios, mayor es el  $Q_b$ . En este sentido, el caudal básico resulta ser conservador en los ríos de caudal muy fluctuante, es decir los caudales mínimos deben ser mayores en ríos donde no hay una regularidad hidrológica y por lo tanto hay gran alternancia de caudales respecto a los ríos de caudales medios diarios más homogéneos. Por el contrario, no se ha encontrado una relación significativa entre el  $Q_b$  y el Coeficiente de Variación de los caudales medios diarios (CV), ya que éste por su parte no está estadísticamente correlacionado con la desviación estándar. Así, en muchos de los ríos considerados se puede encontrar una desviación estándar muy alta tanto si tienen un CV muy alto debido a que el caudal medio es muy pequeño, como si tienen un CV bajo al presentar un caudal medio alto.

Por último, no se ha encontrado una correlación significativa entre el  $Q_b$  y el caudal máximo, mientras que sí se ha encontrado con el caudal mínimo ( $r^2 = 0,71$ ), lo que indica que a menores caudales mínimos, menores caudales básicos. Esto tiene un cierto sentido y concuerda con el proceso de cálculo del  $Q_b$  y su significado, ya que éste queda definido por los períodos de sequía y no por los períodos de crecidas.

No obstante, cabe destacar que en este apartado se han realizado simples correlaciones (que pueden ser debidas a una relación de causalidad o a mero azar) para tener una idea de cómo funciona el método al calcular el  $Q_b$  para cada río, cuando se podrían haber utilizado otros procedimientos estadísticos más interesantes como un análisis factorial o de componentes principales. Además, los ríos utilizados como base de datos no constituyen un grupo homogéneo, sino todo lo contrario, ya que lo que se busca es precisamente probar la metodología en el mayor número posible de situaciones (ríos muy mediterráneos, ríos de alta montaña, ríos más continentales,...), por lo que los resultados obtenidos pueden ser en ciertos casos muy variables (por ejemplo el porcentaje que  $Q_b$  representa respecto al  $Q_m$ , que va del 1% al 50%). Estos aspectos se abordan con más precisión en apartados siguientes al aplicar la metodología a una unidad hidrogeográfica donde además se va a realizar una zonificación en unidades homogéneas.

#### **4.1.9 CONDICIONES HIDRÁULICAS GENERADAS POR EL CAUDAL BÁSICO**

##### **4.1.9.1 Morfometría e hidráulica de los tramos estudiados en las condiciones de muestreo**

Para cada una de las secciones analizadas de los 7 tramos de río seleccionados (ver apartado 3.1.8), se han calculado una serie de parámetros morfométricos e hidráulicos, que lógicamente están referidos al caudal circulante en el momento de realizar las mediciones. La tabla 4.10 muestra los resultados obtenidos.

El río con un cauce más amplio es el Cinqueta, con una anchura media en los transectos realizados de 16,5 m hasta un máximo de 25,6 m. El resto de los tramos de río considerados presentaron todos una anchura de cauce similar en los muestreos, con valores medios que oscilan entre los 6 m (río Tor) y los 8,8 m (río Carol). La sección de cauce más estrecha correspondió al río Sallent, con 3,5 m.

La profundidad máxima ha sido en todos los casos inferior al metro. Los mayores valores se midieron en el río Cinqueta (hasta 0,97 m), lo que junto con la alta velocidad del agua complicó extraordinariamente las mediciones en los transectos de cauce. En el río Sallent, con un calado medio de 0,19 m, la profundidad máxima fue considerablemente inferior al resto de los tramos (0,30 m).

El Cinqueta fue también el río con un mayor perímetro mojado, (máximo de 26,50 m y una media de 17,20 m). El menor valor absoluto de este parámetro se encontró en una sección del río Sallent con 3,50 m, pero el río Tor es el que presentó en promedio un perímetro mojado más bajo (6,21 m de media).

Las mayores secciones transversales correspondieron lógicamente al río Cinqueta en consonancia con las dimensiones de su cauce en el momento del muestreo. La mayor sección en ese río fue de 7,46 m<sup>2</sup> con una media de 6,08 m<sup>2</sup> para el conjunto de transectos realizados. En cuanto a las menores secciones, de nuevo se encontraron en el río Sallent, con una mínima de 0,21 m<sup>2</sup> y una media de 0,50 m<sup>2</sup>. El radio hidráulico, que relaciona la superficie de la sección con su perímetro mojado fue máximo en el río Cinqueta (0,49 m) y mínimo en el río Sallent (0,03 m).

En cuanto a la velocidad del agua, aunque la máxima absoluta se registró en el río Cinqueta (2,71 m/s), el río con unas velocidades máximas constantemente mayores fue el Carol con 1,81 m/s de media para todas las secciones. En el río Sallent, la media de las máximas fue de 0,98 m/s que es un valor ciertamente considerable para el tipo de río de que se trata. Por otro lado, con la excepción del Sallent que presenta velocidades medias de 0,43 m/s, los otros ríos presentan promedios, para el conjunto de sus transectos, bastante similares, oscilando entre 0,56 y 0,65 m/s. La sección con una mayor velocidad media del agua se midió en el río Tor y en el Cinqueta, en ambos casos de 0,82 m/s

En relación al caudal circulante en el momento del muestreo, el del río Cinqueta resultó ser el más alto, con 3,64 m<sup>3</sup>/s. En el resto de ríos, los caudales fueron significativamente inferiores (Noguera Ribagorzana: 1,73 m<sup>3</sup>/s; Baliera: 1,29 m<sup>3</sup>/s; Vallferrera: 0,99 m<sup>3</sup>/s; Carol: 0,84 m<sup>3</sup>/s; Tor: 0,79 m<sup>3</sup>/s) destacando el río Sallent con un caudal de 0,19 m<sup>3</sup>/s. Dentro de cada tramo de río estudiado, como muestran las tablas correspondientes, existe una dispersión de los valores de caudales calculados en cada sección. Esta situación es habitual en tramos de río de substrato variado y morfología heterogénea, al margen de los inevitables errores propios que siempre acompañan a las mediciones de campo.

La figura 4.13 constituye un ejemplo para el río Baliera de la representación de las principales características morfométricas e hidráulicas reseñadas con anterioridad donde se muestra la batimetría, secciones transversales que nos permiten ver, además de la anchura y el calado, la heterogeneidad del perímetro mojado, así como la distribución transversal de la velocidad del agua en las distintas secciones. Esta velocidad transversal



es, lógicamente, el resultado de la interacción entre el flujo de agua y las características de profundidad y heterogeneidad de las secciones. La batimetría de los tramos estudiados, así como el resto de aspectos considerados en su caracterización morfológica e hidráulica, son los referentes fundamentales para evaluar, tanto de forma cuantitativa como gráfica, los principales cambios en las características de habitabilidad biológica de los tramos estudiados tras la implementación (por simulación) de los caudales básicos correspondientes.

#### **4.1.9.2 Simulación de Caudales Básicos**

Como ya se ha mencionado, en todos los ríos del estudio el  $Q_b$  que se propone es sensiblemente menor que el que se encontró el día del muestreo. Evidentemente, esto conlleva que todas las características morfométricas e hidráulicas varíen, como se puede apreciar en la tabla 4.10.

Básicamente, los cambios derivados de tal simulación se pueden concretar en los siguientes puntos:

- El  $Q_b$  calculado para los diferentes ríos fue sensiblemente más bajo que el encontrado en las condiciones de verano de muestreo en todos los casos. Este hecho se tradujo en una reducción en el valor de todos los parámetros morfométricos e hidráulicos en todas las secciones. La superficie de sección transversal de flujo disminuyó en más del 50% respecto a las condiciones del momento de muestreo en la mayoría de los ríos, obteniéndose unos valores que varían entre  $0,16 \text{ m}^2$  (río Sallent) y  $2,16 \text{ m}^2$  (río Cinqueta). En ambos casos, las secciones limitantes (definidas en el apartado 3.1.8 como secciones regulares, muy anchas y de poco calado) del tramo estudiado obtuvieron valores mayores.
- La variación de la lámina de agua produjo una reducción de las profundidades máximas. Esta reducción fue máxima para el río Cinqueta con un valor medio de 30 cm (de 0,82 m disminuyó a 0,52 m), mientras que en el río Sallent sólo se redujo en 6 cm. En cualquier caso, tanto las secciones limitantes como las secciones medias de los distintos tramos mostraron una profundidad máxima superior a 20 cm para todos los ríos excepto para el río Sallent, el cual tuvo una profundidad máxima media de 11 cm. Por su parte, las profundidades medias bajo las condiciones de simulación del  $Q_b$  para todas las secciones limitantes y medias también disminuyeron, aunque en menor medida que las profundidades máximas. Los valores de las profundidades medias variaron entre 6 cm (río Sallent) y 23 cm (río Cinqueta) para las secciones medias de cada río, mientras que para las secciones limitantes los valores se situaron entre los 5 cm (río Sallent) y los 18 cm (río Tor).
- La anchura de lámina de agua y el perímetro mojado tuvieron valores similares y siguieron el mismo patrón de disminución que las profundidades, con reducciones que van del 19% al 45% aproximadamente respecto a los valores iniciales naturales de muestreo, excepto en la sección limitante del río Vallferrera donde no decreció tanto como en las otras debido a geometría particular (orillas empinadas y cauce relativamente plano y regular). Al simular el  $Q_b$ , la anchura media mayor se encontró en el río Cinqueta (10,7 m) mientras que el río más estrecho resultó ser el Sallent (3,38

m). El resto de los ríos tuvieron anchuras intermedias entre 4,1 m y 6,07 m. Las secciones limitantes resultaron ser más anchas que las secciones medias.

- Las velocidades medias del flujo del agua bajo los  $Q_b$  simulados variaron entre los 0,48 m/s correspondientes al río Tor y los 0,32 m/s del Sallent, valor este último que no resulta excesivamente bajo para las reducidas dimensiones del cauce y el  $Q_b$  calculado.

De lo expuesto se deduce que los cambios derivados de la implementación (simulación) del  $Q_b$ , supondrían un grado de modificación importante de las características morfológicas e hidráulicas de los tramos de río considerados respecto a la situación de referencia (condiciones de muestreo). El siguiente paso consistiría en ver cómo estas modificaciones condicionan el nivel de habitabilidad que quedaría en los tramos de río tras la implementación de los caudales básicos calculados.

El concepto de habitabilidad en ríos se puede expresar como cantidad y calidad del espacio habitable o hábitat físico. Algunas metodologías utilizadas para calcular caudales mínimos en ríos definen la habitabilidad como una función más o menos compleja de muchos factores (por ejemplo los métodos de simulación de hábitats; Bovee, 1982), la cual no siempre funciona debido a la dificultad de establecer modelos para todos los parámetros que entran a formar parte de la función. Para el método del Caudal Básico, la habitabilidad de un tramo de río se puede definir desde su acepción más simple, a partir únicamente de la profundidad o calado del agua (Palau *et al.*, 1997). Es cierto que el tipo de sustrato y la distribución transversal de velocidades son elementos muy importantes a la hora de definir la habitabilidad en ríos, pero no hay que olvidar que lo que se pretende es mantener el ecosistema acuático tal como es y no buscar una máxima productividad potencial, por lo que no habría que tener como objetivo un cambio en el sustrato (la misma naturaleza se encargará de modificarlo de acuerdo al nuevo régimen hidrológico). Además, el perfil de velocidades en un río es función de la distribución de profundidades y de la regularidad y tipo de sustrato y difícilmente ajustable, por lo que el factor clave a gestionar sería precisamente la profundidad del agua.

A pesar de que existen numerosas referencias en la bibliografía que definen valores mínimos de profundidad de agua para mantener la habitabilidad de los ríos, éstas normalmente difieren entre sí (Tabla 4.9). Salvo casos especiales en los que el objetivo sea conservar un valor ambiental concreto (un paisaje fluvial, una comunidad vegetal de ribera, especies de fauna de ribera, etc.), lo normal es que el referente de conservación sea la comunidad de peces ya que al garantizar ésta normalmente se garantiza el hábitat para el resto de los organismos acuáticos. Pero no todas las especies de peces tienen los mismos requerimientos de espacio, e incluso una misma especie puede tener requerimientos diferentes bajo condiciones ambientales distintas o para los distintos estadios de desarrollo. Así por ejemplo, Stalnaker y Arnette (1976) recomendaban la necesidad de profundidades superiores a 12 cm para el normal desplazamiento de las truchas pequeñas (< 15 cm de longitud furcal), y a 18 cm para las de tamaño superior. Así mismo, la velocidad media del agua no debía superar los 1,2 m/s para las truchas pequeñas, y los 2,4 m/s para las más grandes, valores de velocidad media ambos difícilmente alcanzables en ríos naturales ibéricos. En zonas de refugio, estos mismos autores indican que el calado debe ser superior a unos 24 cm, y la velocidad del agua entre 0,10 y 0,20 m/s.

Otros autores (Gordon *et al.*, 1992) recogen como referencia para las truchas una profundidad de 20 cm, o de 25 a 30 cm en otros casos (García de Jalón, 1992). En definitiva parece que existe un cierto consenso en un relativamente estrecho intervalo de profundidades mínimas recomendables que se podría definir entre los 20 y los 25 cm en la gran mayoría de casos, como el referente de habitabilidad.

Los resultados de la simulación del Qb sobre las distintas secciones de los tramos estudiados (Tabla 4.10) muestran que en todos los ríos excepto en el Sallent se consiguen profundidades máximas claramente mayores a los 20-25 cm de referencia no solo en las secciones medias sino también en las secciones limitantes. Incluso algunas de las profundidades medias (ríos Baliera, Cinqueta y Noguera Ribagorzana) están por encima del umbral recomendado para proporcionar un hábitat físico adecuado, lo que quiere decir que en un porcentaje elevado de las secciones existen esas profundidades mínimas. En el río Sallent, por el contrario, no se consiguen las profundidades mínimas recomendadas al simular el Qb. Este hecho era de esperar ya que se trata de un río que con el caudal de estiaje medio, las profundidades máximas no superan el umbral establecido (oscilaban entre 10 y 30 cm). No obstante, al simular el Qb la profundidad media disminuye en una proporción similar a otros ríos, incluso en la sección más limitante donde se reduce en 1 cm (pasa de 6 a 5 cm).

Por último, las velocidades del agua obtenidas de la simulación del Qb muestran que tampoco existen limitaciones de habitabilidad en este sentido.

Cabe concluir, por tanto, que los valores de Qb calculados no suponen, de acuerdo con el resultado de la simulación realizada y los criterios establecidos, unas condiciones de habitabilidad calificables de críticas en ningún sentido.

Tabla 4.9. Valores de profundidades de lámina de agua donde existe una probabilidad de ocurrencia de individuos mayor del 90% (óptimo) y entre el 60 – 90% (valores mínimos recomendables) para distintas especies y etapas de desarrollo.

Fuente	Adulto		Juvenil		Alevín		Frezadero		Refugio		Especie
	>90	60-90	>90	60-90	>90	60-90	>90	60-90	>90	60-90	
Belaud et al. (1989)	30-40	30	25-35	20			15-25	15			brown trout
Sabatón et al. (1995)	55	40	20-85	15	20-60	15	20-25	20			trucha fario
Bovee (1978)	70	35	20-80	20			20-50	15			brown trout
Loar (1985)	25-35	25	25-35	15			25-35	15			brown trout
Chaveroche y Sabatón (1989)	35-40	35	>25	25			15-50	15			brown trout
Stalnaker y Arnette (1976)		18		12					24		trucha
Gordon et al. (1992)		20									brown trout
García de Jalón (1992)		25-30									trucha

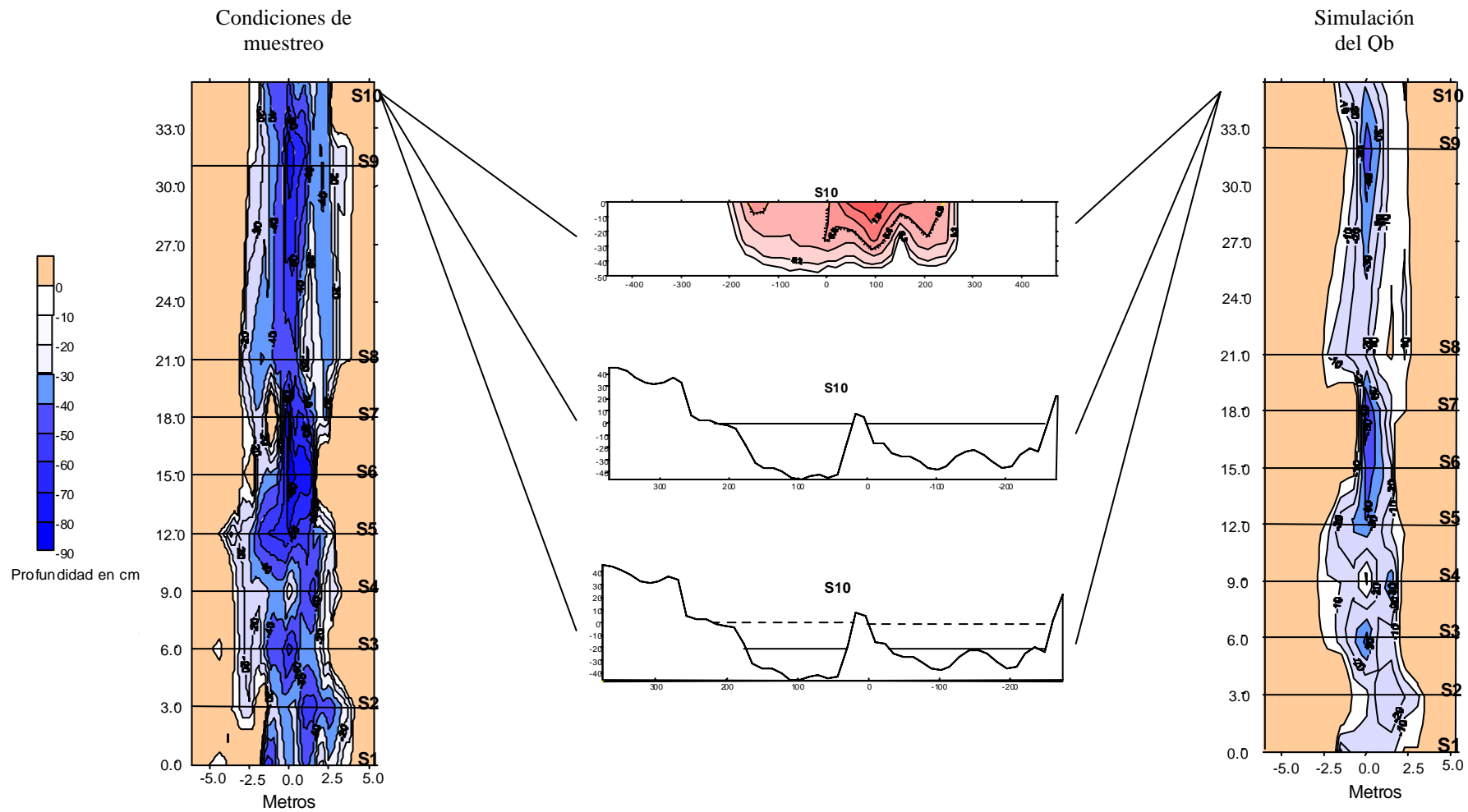


Figura 4.13. Ejemplo de distribución de profundidades y perfil de velocidades en sección transversal para el río Baliera bajo las condiciones de muestreo y la simulación del Ob.

Tabla 4.10. Cálculo de parámetros morfométricos en las distintas secciones de los ríos estudiados para el caudal circulante en las condiciones de muestreo (c.m.) y para el Qb simulado (Sim.). (Y = distancia a la primera sección; Pte. = pendiente; Elev. = elevación de la lámina de agua; A = amplitud del cauce; Pmax. = profundidad máxima; Pmed = profundidad media; PM = perímetro mojado; S = superficie de la sección de flujo; RH = radio hidráulico; Vmax = velocidad máxima; Vmed = velocidad media; Q = caudal)

Río Baliera																						
	Y (m)	Pte (%)	Elev. (m)		A (m)		Pmax. (m)		Pmed. (m)		PM (m)		S (m <sup>2</sup> )		RH		Vmax (m/s)	Vmed. (m/s)			Q (m <sup>3</sup> /s)	
			c.m.	Sim.	c.m.	Sim.	c.m.	Sim.	c.m.	Sim.	c.m.	Sim.	c.m.	Sim.	c.m.	Sim.	c.m.	c.m.	Sim.	c.m.	Sim.	
S1	0.0	0.78	0.00	-0.20	6.88	4.12	0.56	0.36	0.27	0.18	7.65	4.63	1.59	0.61	0.21	0.13	1.72	0.69	0.51	1.10	0.31	
S2	3.0	0.55	0.00	-0.25	6.89	4.52	0.55	0.30	0.32	0.16	7.31	4.66	2.15	0.68	0.29	0.15	1.26	0.73	0.46	1.57	0.31	
S3	6.0	0.16	0.00	-0.17	6.28	4.66	0.64	0.47	0.32	0.21	6.64	4.89	1.92	1.00	0.29	0.20	1.08	0.63	0.31	1.21	0.31	
S4*	9.0	0.63	0.00	-0.18	6.95	4.96	0.56	0.38	0.26	0.14	7.40	5.25	1.76	0.68	0.24	0.13	1.14	0.68	0.45	1.20	0.31	
S5	12.0	0.13	0.00	-0.30	7.35	4.97	0.70	0.40	0.43	0.22	7.72	5.11	3.08	1.09	0.40	0.21	0.76	0.43	0.29	1.32	0.31	
S6	15.0	0.21	0.00	-0.41	4.12	2.27	0.88	0.47	0.53	0.33	5.02	2.72	2.10	0.73	0.42	0.27	0.81	0.57	0.42	1.20	0.31	
S7	18.0	0.53	0.00	-0.30	4.89	2.53	0.85	0.55	0.36	0.25	5.93	3.09	1.75	0.58	0.30	0.19	1.45	0.72	0.53	1.26	0.31	
S8	21.0	0.60	0.00	-0.23	7.20	5.00	0.49	0.26	0.30	0.14	7.61	5.20	2.04	0.69	0.27	0.13	1.46	0.71	0.45	1.45	0.31	
S9	31.9	0.38	0.00	-0.31	6.90	3.73	0.78	0.47	0.35	0.18	7.24	3.98	2.26	0.71	0.31	0.18	1.20	0.63	0.44	1.42	0.31	
S10	35.4	0.49	0.00	-0.21	5.20	4.28	0.50	0.29	0.34	0.16	5.59	4.50	1.65	0.69	0.30	0.15	1.32	0.69	0.45	1.14	0.31	
<b>MEDIA</b>		<b>0.45</b>	<b>0.00</b>	<b>-0.26</b>	<b>6.27</b>	<b>4.10</b>	<b>0.65</b>	<b>0.40</b>	<b>0.35</b>	<b>0.20</b>	<b>6.81</b>	<b>4.40</b>	<b>2.03</b>	<b>0.75</b>	<b>0.30</b>	<b>0.17</b>	<b>1.22</b>	<b>0.65</b>	<b>0.43</b>	<b>1.29</b>	<b>0.31</b>	
Río Cinqueta																						
S1	0.0	0.12	0.00	-0.29	14.16	7.44	0.93	0.64	0.38	0.33	14.69	7.74	5.64	2.39	0.38	0.31	1.41	0.61	0.35	3.44	0.84	
S2	280.0	0.38	0.00	-0.33	16.35	8.73	0.81	0.48	0.42	0.22	16.98	9.06	6.17	1.80	0.36	0.20	1.53	0.65	0.47	4.01	0.84	
S3	285.5	0.35	0.00	-0.24	9.16	8.01	0.70	0.46	0.46	0.22	9.92	8.43	3.82	1.79	0.39	0.21	1.28	0.82	0.47	3.13	0.84	
S4	290.5	0.14	0.00	-0.39	12.28	7.94	0.93	0.54	0.54	0.29	12.70	8.11	6.02	2.35	0.47	0.29	0.81	0.55	0.36	3.31	0.84	
S5	395.5	0.18	0.00	-0.35	12.50	9.53	0.97	0.62	0.53	0.25	12.90	9.78	6.34	2.34	0.49	0.24	1.22	0.58	0.36	3.68	0.84	
S6*	415.2	0.36	0.00	-0.27	25.59	14.51	0.77	0.50	0.31	0.16	26.54	14.88	7.46	2.23	0.28	0.15	1.24	0.52	0.38	3.88	0.84	
S7	421.5	0.50	0.00	-0.22	25.54	18.75	0.60	0.38	0.30	0.13	26.36	19.22	7.09	2.24	0.27	0.12	2.71	0.57	0.37	4.04	0.84	
<b>MEDIA</b>		<b>0.29</b>	<b>0.00</b>	<b>-0.30</b>	<b>16.51</b>	<b>10.70</b>	<b>0.82</b>	<b>0.52</b>	<b>0.42</b>	<b>0.23</b>	<b>17.16</b>	<b>11.03</b>	<b>6.08</b>	<b>2.16</b>	<b>0.38</b>	<b>0.22</b>	<b>1.46</b>	<b>0.61</b>	<b>0.39</b>	<b>3.64</b>	<b>0.84</b>	

\* Secciones limitantes

Tabla 4.10. Continuación

Río Vallferrera																					
	Y (m)	Pte (%)	Elev. (m)		A (m)		Pmax. (m)		Pmed. (m)		PM (m)		S (m <sup>2</sup> )		RH		Vmax (m/s)	Vmed. (m/s)		Q (m <sup>3</sup> /s)	
S1	0.0	0.35	0.00	-0.20	6.55	3.74	0.63	0.43	0.28	0.22	7.28	4.23	1.76	0.73	0.24	0.17	1.18	0.51	0.41	0.90	0.29
S2	3.0	0.50	0.00	-0.14	7.63	6.00	0.54	0.40	0.22	0.13	8.49	6.64	1.74	0.78	0.20	0.12	1.41	0.55	0.38	0.96	0.29
S3	6.0	1.10	0.00	-0.13	6.90	4.91	0.39	0.26	0.2	0.13	7.62	5.40	1.35	0.57	0.18	0.11	1.44	0.73	0.52	0.99	0.29
S4	9.0	1.01	0.00	-0.15	7.42	4.76	0.46	0.31	0.21	0.14	8.35	5.37	1.55	0.58	0.19	0.11	1.41	0.73	0.51	1.13	0.29
S5	12.0	0.73	0.00	-0.13	7.10	5.71	0.39	0.26	0.22	0.12	7.56	6.07	1.50	0.67	0.20	0.11	1.23	0.65	0.44	0.98	0.29
S6	15.0	0.31	0.00	-0.15	7.25	6.28	0.47	0.32	0.27	0.14	7.75	6.64	1.93	0.90	0.25	0.14	1.02	0.49	0.33	0.95	0.29
S7	18.0	0.33	0.00	-0.15	7.35	5.44	0.42	0.27	0.25	0.16	7.83	5.80	1.80	0.84	0.23	0.14	1.09	0.48	0.35	0.86	0.29
S8	21.0	0.95	0.00	-0.14	6.90	5.48	0.37	0.23	0.22	0.12	7.71	6.01	1.53	0.62	0.20	0.10	1.49	0.74	0.48	1.13	0.29
S9	24.0	0.52	0.00	-0.18	6.62	4.42	0.47	0.29	0.30	0.15	7.14	4.68	1.67	0.67	0.23	0.14	1.67	0.61	0.44	1.02	0.29
S10*	27.0	0.50	0.00	-0.13	6.71	6.23	0.39	0.26	0.25	0.13	7.20	6.59	1.64	0.78	0.23	0.12	1.07	0.59	0.38	0.97	0.29
<b>MEDIA</b>		<b>0.63</b>	<b>0.00</b>	<b>-0.15</b>	<b>7.04</b>	<b>5.30</b>	<b>0.45</b>	<b>0.30</b>	<b>0.24</b>	<b>0.14</b>	<b>7.69</b>	<b>5.74</b>	<b>1.65</b>	<b>0.71</b>	<b>0.21</b>	<b>0.13</b>	<b>1.30</b>	<b>0.61</b>	<b>0.42</b>	<b>0.99</b>	<b>0.29</b>
Río Tor																					
S1	0.0	0.27	0.00	-0.12	5.45	4.69	0.40	0.28	0.27	0.17	5.58	4.77	1.46	0.86	0.26	0.18	1.04	0.47	0.37	0.69	0.31
S2	3.0	0.26	0.00	-0.14	5.45	4.65	0.45	0.31	0.29	0.17	5.59	4.74	1.56	0.86	0.28	0.18	1.50	0.48	0.36	0.75	0.31
S3	6.0	0.81	0.00	-0.10	4.65	4.19	0.41	0.31	0.24	0.16	4.89	4.38	1.05	0.60	0.21	0.14	1.51	0.72	0.53	0.76	0.31
S4	9.0	0.43	0.00	-0.12	6.40	4.87	0.43	0.31	0.22	0.15	6.51	4.93	1.41	0.75	0.22	0.15	1.33	0.53	0.42	0.75	0.31
S5	12.0	0.52	0.00	-0.15	7.35	5.11	0.45	0.30	0.22	0.14	7.52	5.24	1.63	0.73	0.22	0.14	1.51	0.53	0.43	0.86	0.31
S6*	15.0	0.98	0.00	-0.10	6.00	4.29	0.35	0.25	0.19	0.18	6.20	4.44	1.10	0.56	0.18	0.13	1.10	0.70	0.56	0.77	0.31
S7	18.0	0.81	0.00	-0.10	6.77	5.71	0.39	0.29	0.19	0.12	7.09	5.99	1.30	0.67	0.18	0.11	1.67	0.65	0.47	0.85	0.31
S8	21.0	1.25	0.00	-0.11	6.30	4.97	0.41	0.30	0.19	0.12	6.57	5.17	1.15	0.56	0.18	0.11	1.51	0.78	0.56	0.90	0.31
S9	24.0	1.40	0.00	-0.09	5.56	4.82	0.32	0.23	0.17	0.11	5.70	4.90	0.98	0.53	0.17	0.11	1.69	0.82	0.60	0.80	0.31
S10	27.0	0.94	0.00	-0.09	6.21	4.99	0.33	0.24	0.19	0.13	6.43	5.10	1.14	0.60	0.18	0.12	1.33	0.68	0.52	0.78	0.31
<b>MEDIA</b>		<b>0.77</b>	<b>0.00</b>	<b>-0.11</b>	<b>6.01</b>	<b>4.83</b>	<b>0.39</b>	<b>0.28</b>	<b>0.22</b>	<b>0.15</b>	<b>6.21</b>	<b>4.97</b>	<b>1.28</b>	<b>0.67</b>	<b>0.21</b>	<b>0.14</b>	<b>1.42</b>	<b>0.64</b>	<b>0.48</b>	<b>0.79</b>	<b>0.31</b>

\* Secciones limitantes

Tabla 4.10. Continuación

Río Sallent																					
	Y (m)	Pte (%)	Elev. (m)		A (m)		Pmax. (m)		Pmed. (m)		PM (m)		S (m <sup>2</sup> )		RH		Vmax (m/s)	Vmed. (m/s)		Q (m <sup>3</sup> /s)	
S1	0.0	0.48	0.00	-0.14	7.35	3.10	0.30	0.16	0.16	0.08	7.67	3.23	0.95	0.19	0.12	0.06	1.03	0.30	0.23	0.29	0.04
S2	3.0	1.05	0.00	-0.12	6.19	2.21	0.21	0.09	0.11	0.07	6.38	2.25	0.70	0.13	0.11	0.06	1.61	0.38	0.34	0.27	0.04
S3	6.0	0.35	0.00	-0.07	4.16	2.31	0.23	0.16	0.12	0.08	4.30	2.39	0.40	0.18	0.09	0.08	0.47	0.40	0.24	0.16	0.04
S4	9.0	0.27	0.00	-0.08	7.17	4.56	0.24	0.16	0.11	0.07	7.39	4.68	0.70	0.26	0.09	0.06	0.56	0.24	0.17	0.17	0.04
S5	12.0	0.67	0.00	-0.07	5.30	2.98	0.18	0.11	0.09	0.06	5.48	3.07	0.46	0.16	0.08	0.05	0.57	0.35	0.25	0.16	0.04
S6	312.0	6.50	0.00	-0.03	6.90	2.08	0.10	0.07	0.04	0.04	6.93	2.10	0.20	0.07	0.03	0.03	1.05	0.64	0.60	0.13	0.04
S7*	315.0	0.58	0.00	-0.03	9.65	6.23	0.12	0.09	0.06	0.05	9.72	6.28	0.49	0.23	0.05	0.04	0.47	0.29	0.19	0.14	0.04
S8	318.0	0.48	0.00	-0.04	8.76	6.93	0.13	0.09	0.07	0.04	8.80	6.96	0.58	0.25	0.07	0.04	0.76	0.25	0.17	0.15	0.04
S9	321.0	4.80	0.00	-0.05	3.47	1.90	0.13	0.08	0.06	0.05	3.49	1.91	0.21	0.08	0.06	0.04	2.16	0.75	0.56	0.16	0.04
S10	324.0	2.30	0.00	-0.12	3.56	1.48	0.21	0.09	0.10	0.06	3.62	1.51	0.35	0.06	0.10	0.04	1.10	0.71	0.40	0.25	0.04
<b>MEDIA</b>		<b>1.75</b>	<b>0.00</b>	<b>-0.08</b>	<b>6.25</b>	<b>3.38</b>	<b>0.19</b>	<b>0.11</b>	<b>0.09</b>	<b>0.06</b>	<b>6.38</b>	<b>3.44</b>	<b>0.50</b>	<b>0.16</b>	<b>0.08</b>	<b>0.05</b>	<b>0.98</b>	<b>0.43</b>	<b>0.32</b>	<b>0.19</b>	<b>0.04</b>
Río Carol																					
S1	0.0	0.65	0.00	-0.10	9.50	6.50	0.33	0.23	0.16	0.11	9.91	6.73	1.42	0.65	0.14	0.10	1.48	0.49	0.38	0.70	0.25
S2	3.0	0.77	0.00	-0.13	8.74	5.16	0.37	0.24	0.17	0.11	8.99	5.32	1.48	0.57	0.16	0.11	1.60	0.59	0.44	0.87	0.25
S3	6.0	0.53	0.00	-0.11	10.80	7.81	0.33	0.22	0.16	0.10	11.06	8.01	1.72	0.75	0.16	0.09	2.40	0.47	0.33	0.81	0.25
S4*	9.0	0.53	0.00	-0.12	8.75	5.76	0.32	0.20	0.18	0.11	8.88	5.83	1.52	0.66	0.17	0.11	1.53	0.50	0.38	0.76	0.25
S5	12.0	0.68	0.00	-0.13	9.20	6.24	0.37	0.24	0.19	0.11	9.36	6.33	1.75	0.63	0.19	0.10	1.87	0.60	0.39	1.05	0.25
S6	15.0	1.10	0.00	-0.14	9.45	4.28	0.40	0.26	0.16	0.12	9.83	4.50	1.34	0.48	0.14	0.11	1.77	0.62	0.52	0.83	0.25
S7	18.0	1.85	0.00	-0.13	7.64	3.78	0.34	0.21	0.13	0.12	7.86	3.92	1.06	0.38	0.13	0.10	2.38	0.75	0.64	0.80	0.25
S8	21.0	1.26	0.00	-0.13	7.79	5.41	0.38	0.25	0.18	0.09	8.10	5.55	1.35	0.50	0.17	0.09	1.61	0.75	0.50	1.01	0.25
S9	24.0	0.99	0.00	-0.08	7.26	4.76	0.29	0.21	0.14	0.10	7.39	4.85	0.96	0.51	0.13	0.11	1.68	0.72	0.49	0.69	0.25
<b>MEDIA</b>		<b>0.93</b>	<b>0.00</b>	<b>-0.12</b>	<b>8.79</b>	<b>5.52</b>	<b>0.35</b>	<b>0.23</b>	<b>0.16</b>	<b>0.11</b>	<b>9.04</b>	<b>5.67</b>	<b>1.40</b>	<b>0.57</b>	<b>0.15</b>	<b>0.10</b>	<b>1.81</b>	<b>0.61</b>	<b>0.45</b>	<b>0.84</b>	<b>0.25</b>
Río Noguera Ribagorzana																					
S1	0.0	0.16	0.00	-0.17	8.90	7.48	0.61	0.44	0.26	0.20	9.38	7.85	2.95	1.53	0.31	0.19	1.64	0.41	0.30	1.21	0.46
S2	3.0	0.46	0.00	-0.31	9.05	4.96	0.66	0.35	0.33	0.21	10.18	5.59	3.22	0.97	0.32	0.17	1.31	0.70	0.47	2.25	0.46
S3	8.0	0.18	0.00	-0.38	8.20	4.50	0.95	0.57	0.26	0.30	9.30	5.23	3.65	1.25	0.39	0.24	1.38	0.50	0.36	1.83	0.46
S4	26.0	0.53	0.00	-0.17	9.46	7.24	0.69	0.52	0.43	0.19	11.73	8.91	2.51	1.12	0.21	0.13	1.89	0.58	0.41	1.46	0.46
S5	30.0	0.48	0.00	-0.20	9.17	5.16	0.61	0.41	0.53	0.20	10.57	5.87	2.40	0.98	0.23	0.17	1.74	0.59	0.47	1.42	0.46
S6*	33.0	0.41	0.00	-0.26	11.17	7.07	0.61	0.35	0.38	0.17	12.15	7.59	3.73	1.14	0.31	0.15	0.84	0.60	0.40	2.24	0.46
<b>MEDIA</b>		<b>0.37</b>	<b>0.00</b>	<b>-0.25</b>	<b>9.33</b>	<b>6.07</b>	<b>0.69</b>	<b>0.44</b>	<b>0.37</b>	<b>0.21</b>	<b>10.55</b>	<b>6.84</b>	<b>3.08</b>	<b>1.17</b>	<b>0.30</b>	<b>0.18</b>	<b>1.47</b>	<b>0.56</b>	<b>0.40</b>	<b>1.73</b>	<b>0.46</b>

\* Secciones limitantes

### **4.1.9.3 Variación de hábitat potencial útil**

Para ver la variación en el hábitat potencial útil que representa el establecimiento del caudal básico, se ha utilizado el programa RHYHABSIM ver. 3.2 (River Hydraulics and Habitat Simulation) (Jowett, 1999), basado en la metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) (Bovee, 1982, Bovee *et al.*, 1998).

En el Anexo 2 se encuentran los resultados de la variación del área ponderada útil (APU) al aplicar los valores de  $Q_b$  calculados a las distintas secciones de 6 de los ríos estudiados respecto al mínimo caudal medio mensual, que sería el caudal mensual en régimen natural equivalente al  $Q_b$  en régimen de caudales de mantenimiento. También se muestran los resultados de la variación del APU al pasar del caudal medio anual al caudal medio del régimen de caudales de mantenimiento. Para los cálculos del APU se han utilizado las curvas de preferencia descritas por García de Jalón y Schmidt (1998) para la trucha común (*Salmo trutta fario*).

Como se puede apreciar, la reducción de APU que supone el pasar a un  $Q_b$  nunca es mayor al 12.5% respecto al mínimo caudal medio mensual para ninguna sección ni estadio de desarrollo en ninguno de los ríos, siendo la media de las secciones por río siempre inferior al 4.5%. Por el contrario, en un número elevado de secciones el  $Q_b$  supone un aumento del APU, especialmente para los estadios de alevín y frezadero, que ha llegado hasta casi el 27%.

Por otro lado, la reducción que supone el pasar del régimen de caudales naturales al de mantenimiento (entendida como diferencia entre la media de caudales de mantenimiento y el caudal medio anual) nunca ha resultado mayor del 20.1%, siendo la media de las secciones por río siempre inferior al 6.4%. Por el contrario, al igual que pasaba con los caudales mínimos, en un número elevado de secciones el  $Q_b$  supone un aumento del APU, especialmente para los estadios de alevín y frezadero, que ha llegado hasta casi el 12 %.

Por lo tanto, se puede concluir que para los ríos estudiados el establecimiento de un régimen de caudales de mantenimiento no supone grandes reducciones de hábitat potencial útil ni con respecto a caudales medios (si se considera el caudal medio de mantenimiento) ni a caudales mínimos (si se considera el  $Q_b$ ). Por el contrario, y especialmente para los estadios de desarrollo de alevín y frezadero, en muchos casos supone un aumento de hábitat potencial útil al modificar favorablemente para estos estadios las condiciones de velocidad del agua.



## **4.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL CAUDAL BÁSICO A LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL EBRO**

En este apartado se ha procedido primeramente a hacer una regionalización de la cuenca del Ebro buscando zonas homogéneas en cuanto a variables y parámetros relacionados con los caudales de mantenimiento, para posteriormente determinar en cada una de estas zonas cómo se puede calcular el  $Q_b$  para cada estación y a partir de qué variables.

### **4.2.1 REGIONALIZACIÓN DE LA CUENCA DEL EBRO EN FUNCIÓN DEL $Q_b$**

Sobre las 132 variables definidas y/o recopiladas a partir de referencias bibliográficas como parámetros que están o pueden estar relacionados con la determinación de caudales mínimos (Anexo 1), se ha realizado un análisis de correlación para eliminar las variables peor correlacionadas con  $Q_b$  y/o que aporten una información redundante, obteniendo las 51 variables que se relacionan a continuación clasificadas de la siguiente forma:

#### - Variables descriptoras de la cuenca vertiente

- 20: superficie
- 21: pendiente
- 22: Altura media
- 23: Índice de comp. de Gravelius
- 24: Densidad de drenaje
- 25: Capacidad máx. de humedad del suelo
- 26: Capacidad máxima de infiltración
- 27: Coeficiente orográfico
- 28: diferencia de cota / superficie
- 130: (% superf. Forestal/2) + % superf. Agrícola
- 132: % superficie forestal

#### - Variables descriptoras de la hidrología general de la cuenca

- 1: Módulo (caudal medio interanual,  $Q_m$ )
- 3: Caudal mínimo absoluto
- 6: Caudal específico medio
- 9: Predictibilidad
- 10: Constancia
- 11: Contingencia
- 12: Constancia / predictibilidad
- 14: Índice de caudal base
- 16:  $Q_{90\%} / Q_{50\%}$
- 53: Mes en el que se dan caudales máximos
- 56: Promedio de máximos de caudales medios mensuales
- 69: Mes en el que se dan caudales mínimos
- 72: Promedio de mínimos de caudales medios mensuales

#### - Variables relacionadas con la curva de caudales clasificados y su relación con el $Q_b$

- 17: Porcentaje que representa  $Q_b$  respecto al caudal medio anual
- 19: % días con caudales menores a  $Q_b$
- 73:  $Q_{10}$
- 74:  $Q_{90}$

77: Q347

101: Pccc (parámetro de forma de curva de caudales clasificados)

102: Pccc1 (parámetro de forma de curva de caudales clasificados)

103: Pccc2 (parámetro de forma de curva de caudales clasificados)

- Variables resultado del análisis de períodos de caudales mínimos

104: frecuencia de caudales < 5% del módulo

105: frecuencia de caudales < 10% del módulo

106: frecuencia de caudales < 20% del módulo

107: frecuencia de caudales < 40% del módulo

108: frecuencia de caudales < 60% del módulo

109: frecuencia de caudales < 80% del módulo

110: número de días consecutivos con caudal < 5% del módulo

111: número de días consecutivos con caudal < 10% del módulo

112: número de días consecutivos con caudal < 20% del módulo

113: número de días consecutivos con caudal < 40% del módulo

114: número de días consecutivos con caudal < 60% del módulo

115: número de días consecutivos con caudal < 80% del módulo

116: agua necesaria para mantener los caudales >5% del módulo

- Variables que expresan variabilidad de caudales

122: Coeficiente de Variación de caudales medios diarios

124: Coeficiente de variación intraanual de caudales medios diarios

125: Desviación Standard media de caudales medios diarios

126: Coeficiente de Variación interanual de caudales medios diarios

128: Índice de variabilidad calculado como raíz cuadrada de (Q25% / Q75%)

129: Índice de variabilidad calculado como (Q10% - Q90%) / mediana

A continuación se muestran los resultados del proceso de análisis descrito en el apartado 3.2.3 (Figura 3.5) aplicado tanto a los distintos grupos de variables y al global de los mismos para identificar los grupos de estaciones de aforo con características homogéneas que dan lugar a la regionalización de la cuenca del Ebro.

### 4.2.1.1 Análisis en función de variables descriptoras de la cuenca vertiente

Los resultados del análisis de componentes principales realizado sobre el conjunto de variables descriptoras de la cuenca vertiente se muestran en la Figura 4.2.1.

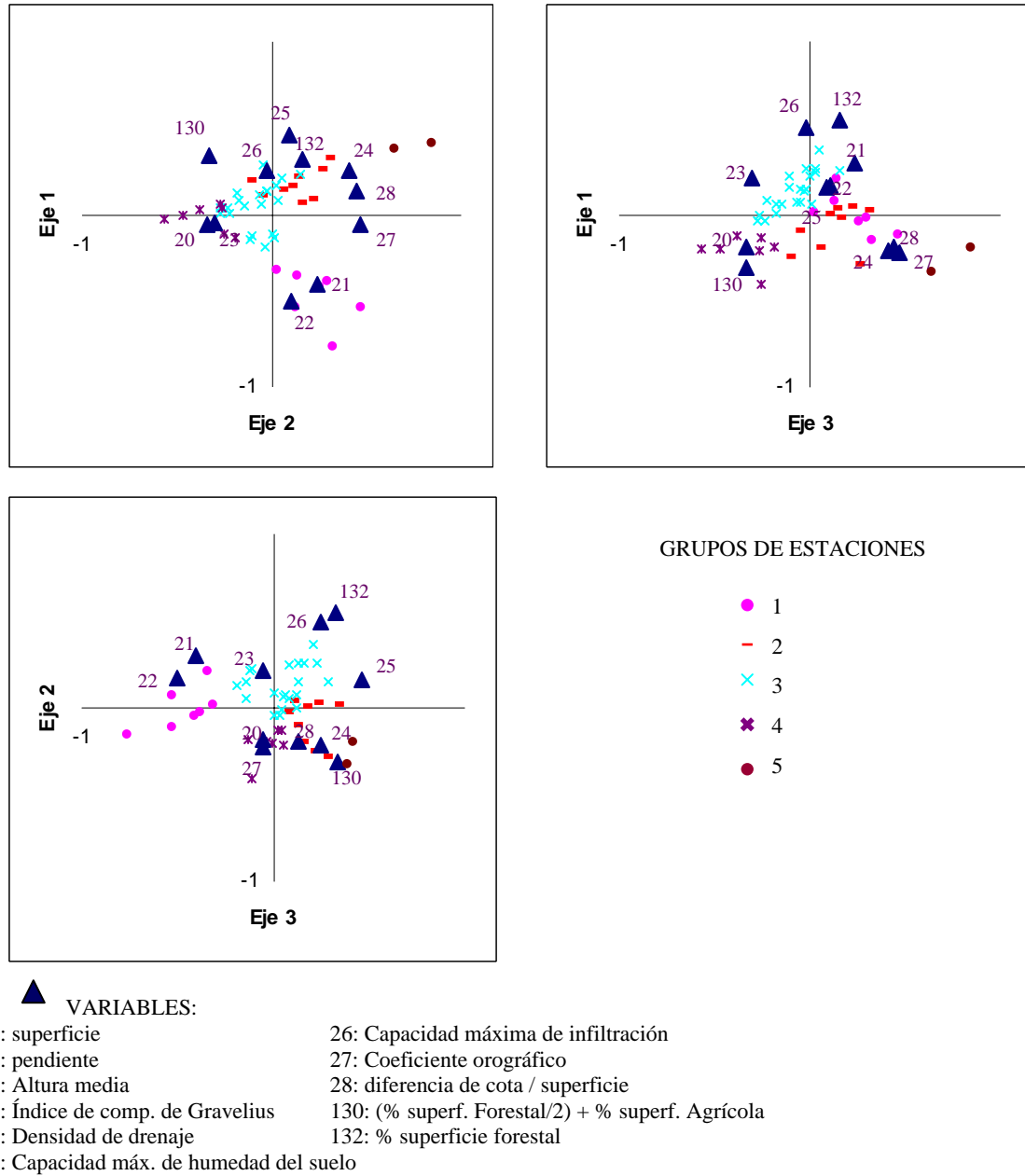


Figura 4.2.1. Resultados del análisis de componentes principales para las variables descriptoras de las características generales de la cuenca donde se muestran tanto el peso de las variables (triángulos azules) sobre los ejes como las coordenadas de las estaciones (agrupadas según los resultados del análisis de cluster de la Figura 4.2.3) sobre los mismos. La suma del porcentaje de varianza explicado por los ejes es del 74%.

El eje 1 explica el 32% de la varianza, y nos separa las estaciones en base a la orografía de sus cuencas vertientes. Valores altos de este eje corresponden a estaciones de aforo de cuencas con una superficie en proyección horizontal pequeña respecto a la diferencia de cota existente (cuencas abruptas) y a la altura media. En contra, valores negativos reflejan cuencas de mayor superficie y con poca diferencia de cotas, normalmente con alturas medias reducidas.

El eje 2 explica el 28% de la varianza, y separa las estaciones según la capacidad máxima de humedad del suelo asociada a los usos del territorio (mayor en zonas boscosas y cultivos permanentes especialmente de regadío, y menor en zonas con escasa vegetación o vegetación de tipo arbustivo), que normalmente está inversamente relacionada con la altitud media de la cuenca y la pendiente. Este eje representaría el gradiente orográfico de la cubierta vegetal y el comportamiento edáfico (características hídricas del suelo) asociado al mismo.

El eje 3 explica el 14% de la varianza, y utiliza la capacidad máxima de infiltración (asociada a la litología) y los usos del suelo para separar las estaciones. Así, valores positivos sobre este eje reflejan zonas de calizas o materiales arenosos y alto porcentaje de superficie forestal, mientras que valores negativos corresponden a zonas poco filtrantes (margas y yesos) y/o con poca superficie forestal.

Como resultado del análisis de componentes principales (Figura 4.2.1) y del análisis de cluster realizado a partir de los mismos (Figura 4.2.3), se han identificado cinco grupos de estaciones (Figura 4.2.2). Así, en el grupo 1 están incluidas las estaciones correspondientes a cuencas de orografía abrupta (gran diferencia de cota respecto a la superficie en proyección horizontal) con una altitud media elevada, y con una capacidad máxima de humedad del suelo pequeña, lo que refleja escasa vegetación o de tipo arbustivo. Son cuencas de cabecera del pirineo.

El grupo 2 incluye estaciones de aforo de cuencas con alta capacidad máxima de humedad del suelo debido a una mayor presencia de vegetación arbórea, cuencas todavía de montaña y abruptas pero con menor altitud media. Son las subcuencas situadas al noroeste.

En el grupo 3 se incluyen las cuencas permeables con gran capacidad máxima de infiltración (zonas calizas o materiales arenosos) y alto porcentaje de superficie forestal, pero no tan abruptas como los grupos anteriores y con mayor superficie. Se sitúan por debajo de las del grupo 1 en los pirineos y al sur-este (margen derecha del río Ebro).

El grupo 4 está formado por un conjunto más reducido de estaciones representantes a cuencas por lo general de gran superficie (por lo tanto los valores del coeficiente orográfico son pequeños) y poco filtrantes (margas y yesos) con poca superficie forestal.

Por último, el grupo 5 incluye a dos estaciones que se diferencian de las demás por tener una superficie muy reducida (lo que resulta en los coeficientes orográficos más elevados a pesar de ser las cuencas de menor altitud media), con mucha superficie forestal pero a su vez zonas poco filtrantes (margas y yesos).

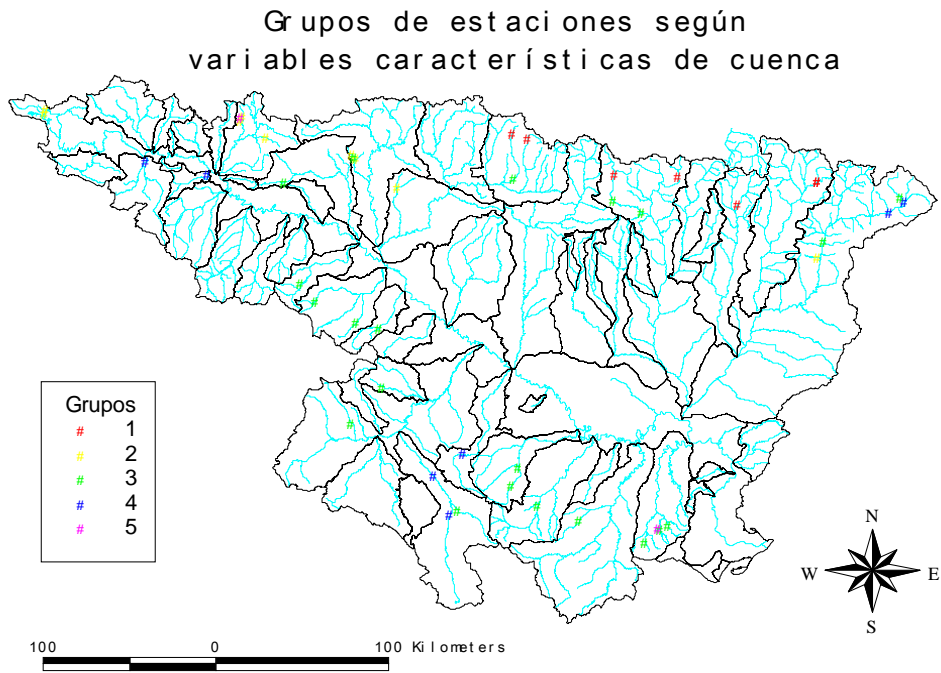


Figura 4.2.2. Distribución de los cinco grupos de estaciones obtenidos a través de los resultados del análisis de componentes principales y del análisis cluster realizado sobre los mismos.

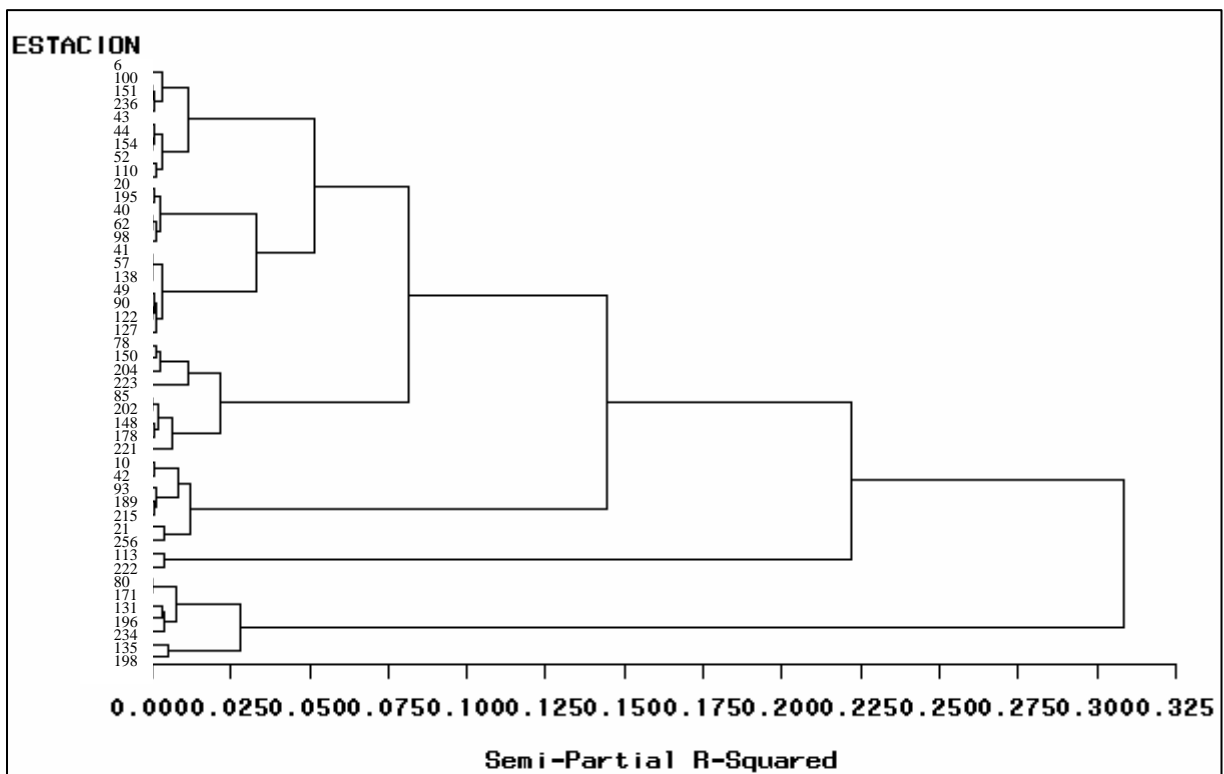
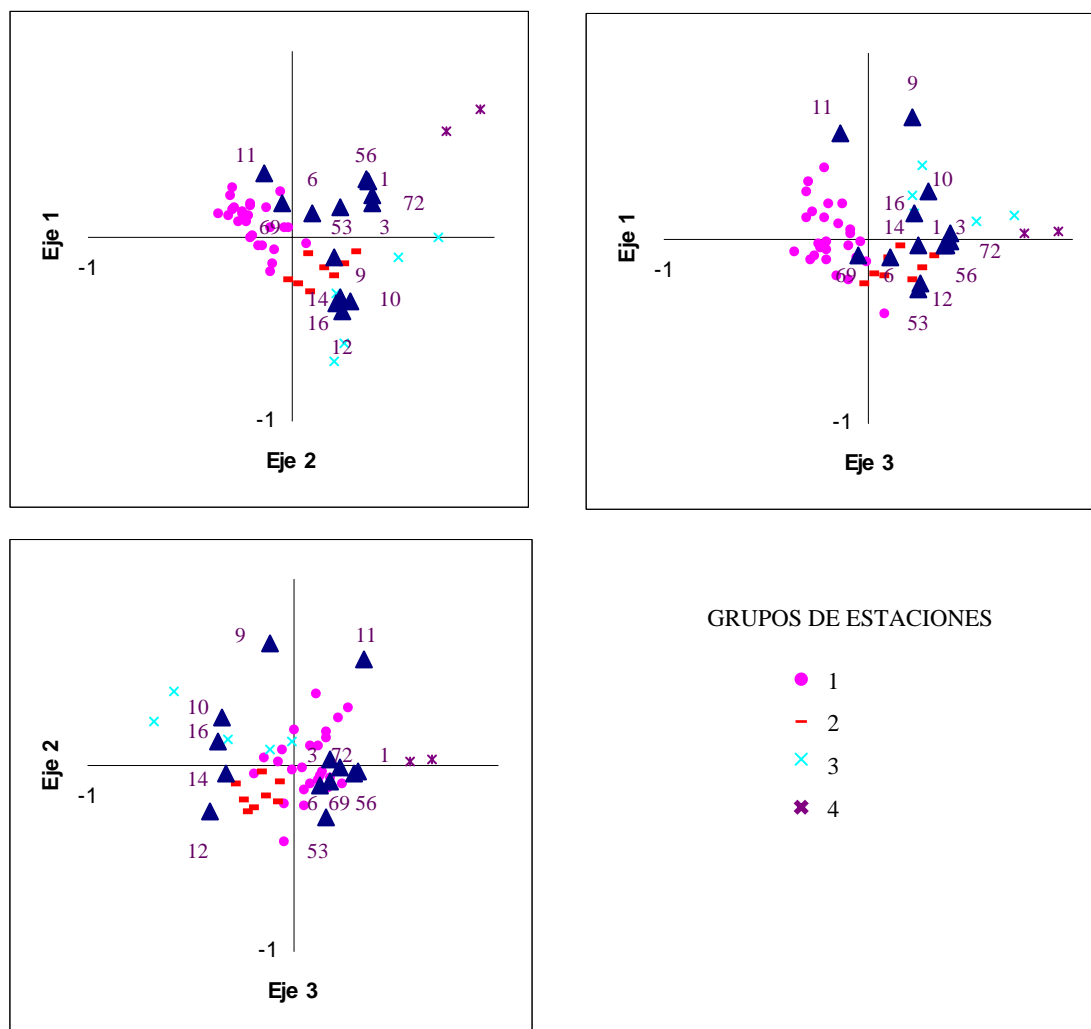


Figura 4.2.3. Análisis tipo cluster realizado tomando como variables las coordenadas de las estaciones sobre los tres ejes resultado del análisis de componentes principales (Figura 4.2.1).

### 4.2.1.2 Análisis en función de variables descriptoras de la hidrología general

Los resultados del análisis de componentes principales realizado sobre el conjunto de variables descriptoras de la hidrología general de la cuenca se muestran en la Figura 4.2.4.



**▲VARIABLES:**

- |  |  |
|--|--|
| 1: Módulo(caudal medio interanual, Qm) | 14: Índice de caudal base                            |
| 3: Caudal mínimo absoluto              | 16: Q90% / Q50%                                      |
| 6: Caudal específico medio             | 53: Mes en el que se dan caudales máximos            |
| 9: Predictibilidad                     | 56: Promedio de máximos de caudales medios mensuales |
| 10: Constancia                         | 69: Mes en el que se dan caudales máximos            |
| 11: Contingencia                       | 72: Promedio de mínimos de caudales medios mensuales |
| 12: Constancia / predictibilidad       |  |

Figura 4.2.4. Resultados del análisis de componentes principales para las variables descriptoras de las características generales de la cuenca donde se muestran tanto el peso de las variables (triángulos azules) sobre los ejes como las coordenadas de las estaciones (agrupadas según los resultados del análisis de cluster de la Figura 4.2.6) sobre los mismos. La suma del porcentaje de varianza explicado por los ejes es del 71%.

El eje 1 explica el 35% de la varianza, y ordena las estaciones en función del valor de los caudales mínimos mensuales, directamente relacionados con el valor del mínimo absoluto y el módulo interanual. Valores altos de este eje corresponden a estaciones con unos caudales medios elevados acompañados de unos caudales medios mensuales y mínimos absolutos también elevados. En contra, valores negativos reflejan regímenes de caudales bajos, con algún mes con caudales medios reducidos y mínimos absolutos también bajos.

El eje 2 explica el 24% de la varianza, y separa las estaciones en función de la constancia de los caudales circulantes. Valores positivos sobre este eje corresponden a estaciones con unos caudales variables a lo largo del año y también entre los distintos años. Por el contrario, valores negativos de este eje señalan caudales más o menos constantes a lo largo del año y también entre los distintos años.

El eje 3 explica el 12% de la varianza y utiliza la predictibilidad en general así como la contingencia para separar las estaciones. Valores positivos sobre este eje corresponden a estaciones con un régimen de caudales predecible, con diferencias estacionales que se manifiestan de forma constante a lo largo de los años.

Como resultado del análisis de componentes principales (Figura 4.2.4) y del análisis de cluster realizado a partir de los mismos (Figura 4.2.6), se han identificado cinco grupos de estaciones (Figura 4.2.5). Así, en el grupo 1 están incluidas las estaciones con regímenes de caudales que presentan una marcada variabilidad anual de caudales y/o entre los distintos años, pero donde predominan los caudales bajos con unos mínimos muy marcados.

El grupo 2 se incluyen estaciones caracterizadas por un régimen de caudales medios que presentan poca variabilidad estacional.

En el grupo 3 se incluyen estaciones que presentan un régimen con caudales más o menos constantes a lo largo del año, con pequeñas variaciones estacionales que se suelen producir de forma constante a lo largo de los años. Estas estaciones presentan unos caudales medios relativamente elevados, sin la presencia de mínimos acusados.

Por último, el grupo 4 incluye a dos estaciones que se caracterizan por presentar los mayores caudales medios y también mínimos, con una marcada variabilidad a lo largo del año e incluso entre años.

### Grupos de estaciones según variables de hidrología general

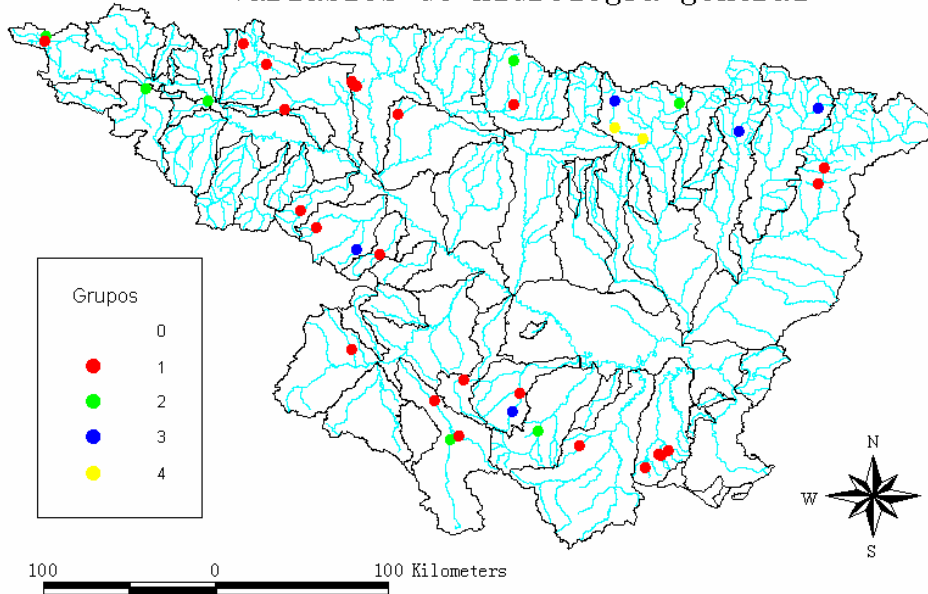


Figura 4.2.5. Distribución de los cuatro grupos de estaciones obtenidos a través de los resultados del análisis de componentes principales y del análisis cluster realizado sobre los mismos.

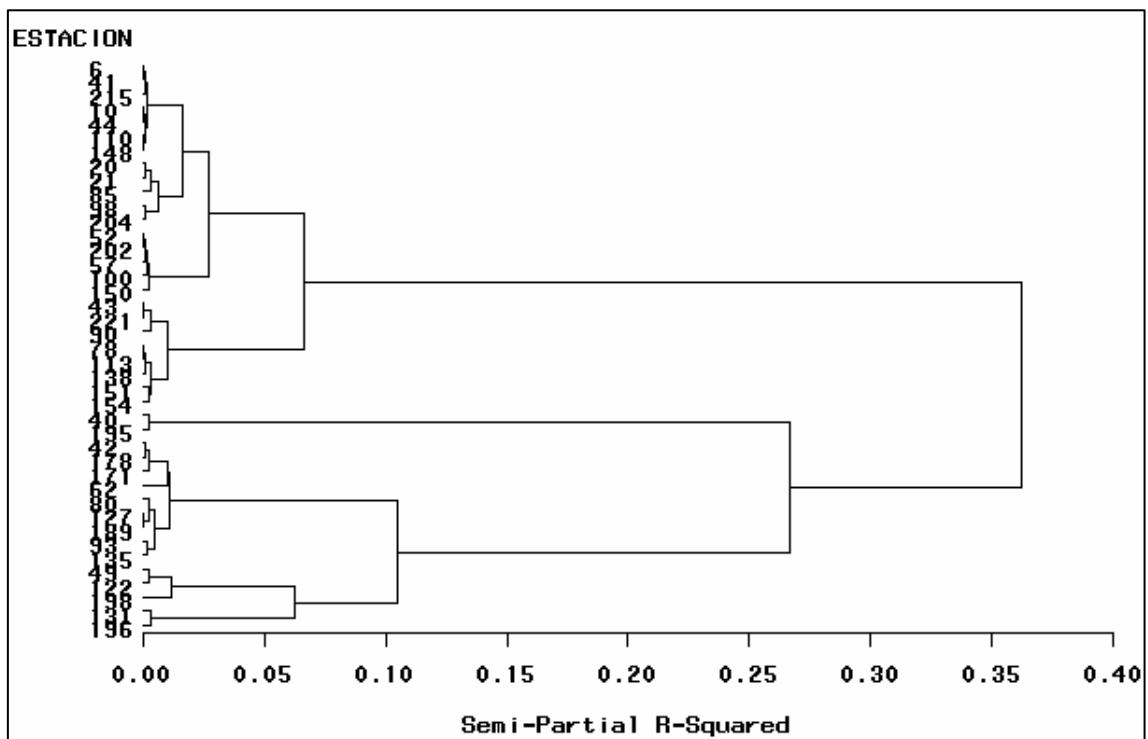


Figura 4.2.6. Análisis tipo cluster realizado tomando como variables las coordenadas de las estaciones sobre los tres ejes resultado del análisis de componentes principales (Figura 4.2.4).



### 4.2.1.3 Análisis en función de variables relacionadas con la curva de caudales clasificados y su relación con Qb

Los resultados del análisis de componentes principales realizado sobre el conjunto de variables relacionadas con la curva de caudales clasificados y su relación con el Qb se muestran en la Figura 4.2.7.

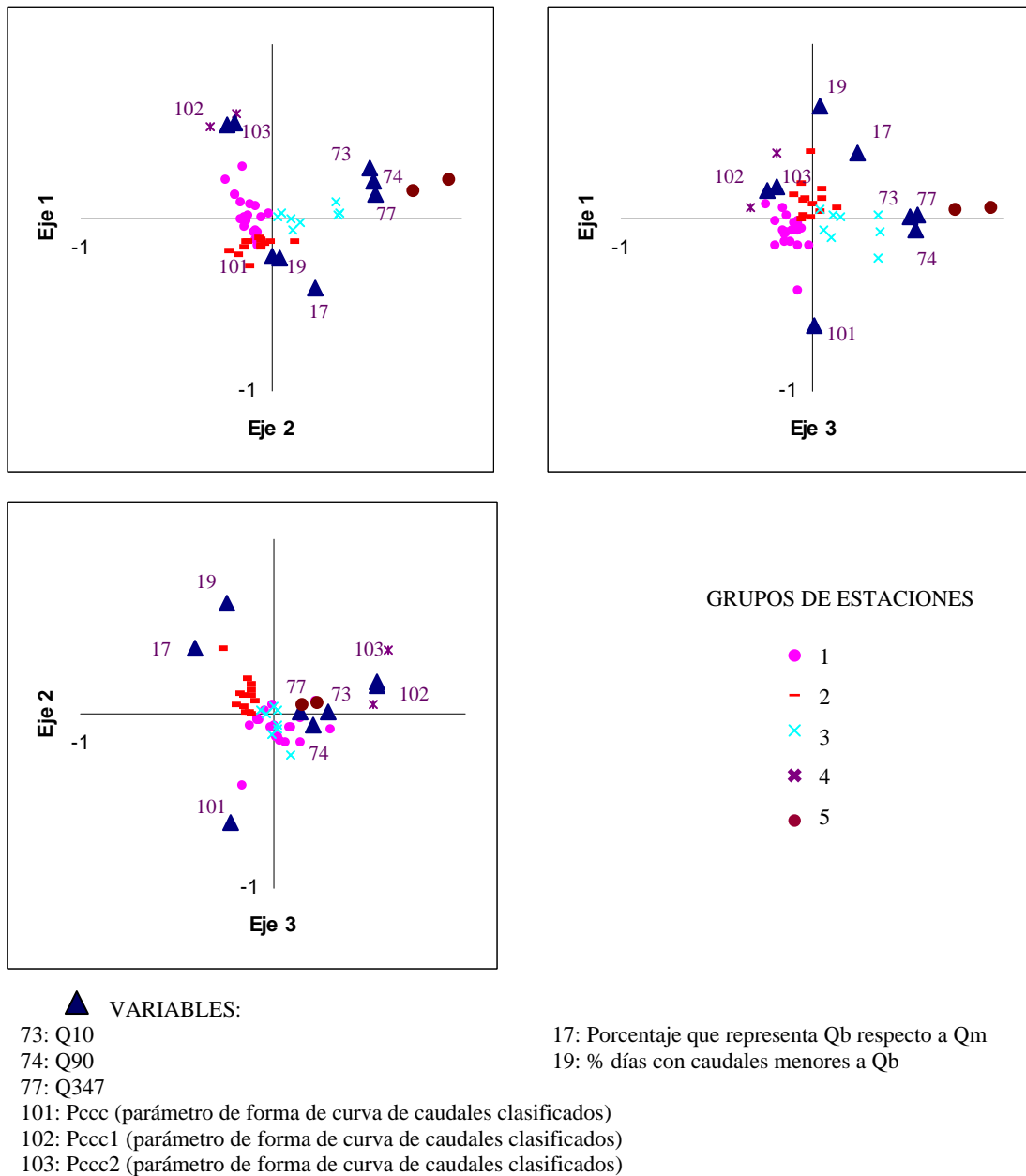


Figura 4.2.7. Resultados del análisis de componentes principales para las variables relacionadas con caudales clasificados donde se muestran tanto el peso de las variables (triángulos azules) sobre los ejes como las coordenadas de las estaciones (agrupadas según los resultados del análisis de cluster de la Figura 4.2.9) sobre los mismos. La suma del porcentaje de varianza explicado por los ejes es del 75%.

El eje 1 explica el 39% de la varianza, y nos separa las estaciones en base a los valores de caudales clasificados. Valores altos de este eje corresponden a estaciones de aforo con unos valores de caudales clasificados altos, representativos tanto de caudales elevados como de caudales bajos (Q10, Q90 y Q347). En contra, valores negativos reflejan estaciones con valores de caudales clasificados bajos.

El eje 2 explica el 22% de la varianza, y separa las estaciones en base a la forma inicial y final de la curva de caudales clasificados. Valores altos de este eje indican formas cóncavas con predominio de régimen de caudales bajos. Valores bajos de este eje indican formas no muy cóncavas características de regímenes con predominio de caudales altos.

El eje 3 explica el 14% de la varianza, y las variables con más peso sobre este eje son el porcentaje de días con caudales menores que el caudal básico y un parámetro representativo de la forma general de la curva de caudales clasificados. Así, valores positivos sobre este eje reflejan estaciones con porcentajes altos de días con caudales menores al caudal básico y con curvas de caudales clasificados equilibradas en cuanto al régimen de caudales altos y bajos, mientras que valores negativos corresponden a estaciones con curvas de caudales clasificados poco cóncavas (predominio de régimen de caudales altos) o muy cóncavas (predominio de régimen de caudales bajos) donde el caudal básico está muy próximo al mínimo (bajos porcentajes de días con caudales menos al caudal básico).

Como resultado del análisis de componentes principales (Figura 4.2.7) y del análisis de cluster realizado a partir de los mismos (Figura 4.2.9), se han identificado cinco grupos de estaciones (Figura 4.2.8). Los grupos 4 y 5 están formados por dos estaciones cada uno, y se diferencian del resto porque tienen valores muy altos respecto a algún eje. El grupo 4 incluye a las estaciones con una parte inicial y final de las curvas de caudales clasificados con forma cóncava muy marcada, mientras que las estaciones del grupo 5 son las que presentan los mayores valores de caudales clasificados fruto de unos caudales circulantes mayores.

De los otros tres grupos de estaciones, las estaciones incluidas en el grupo 3 son las que presentan mayores valores de caudales clasificados, mientras que las de los grupos 1 y 2 presentan valores bajos. Las estaciones del grupo 2 muestran una curva de caudales clasificados más equilibrada en cuanto a régimen de caudales bajos y altos, con un porcentaje mayor de días con caudales menores al caudal básico que los otros dos grupos. Las estaciones del grupo 1 presentan valores medios-bajos de los tres ejes.

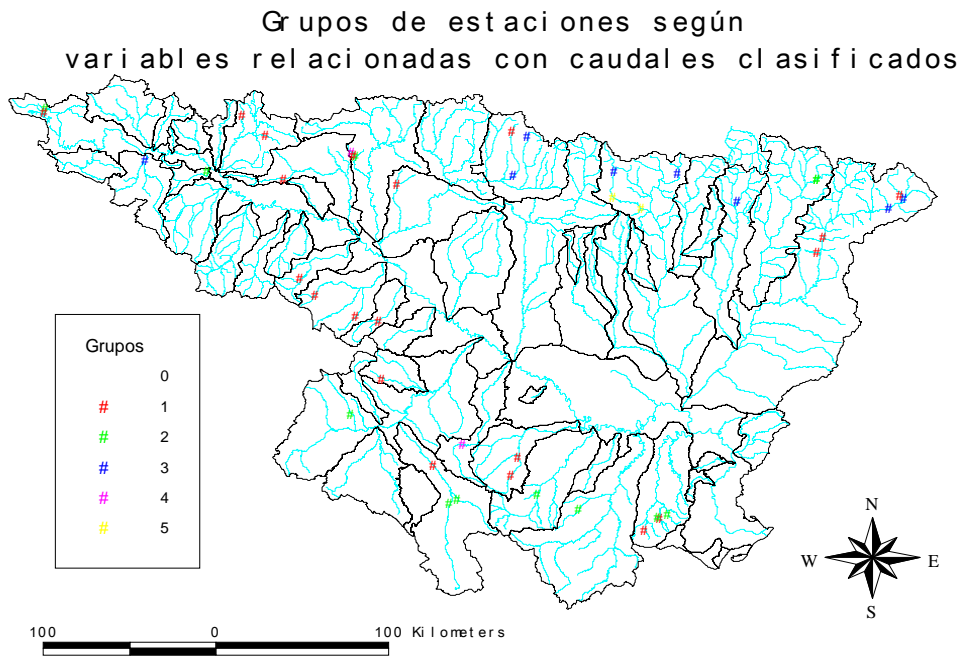


Figura 4.2.8. Distribución de los cuatro grupos de estaciones obtenidos a través de los resultados del análisis de componentes principales y del análisis cluster realizado sobre los mismos.

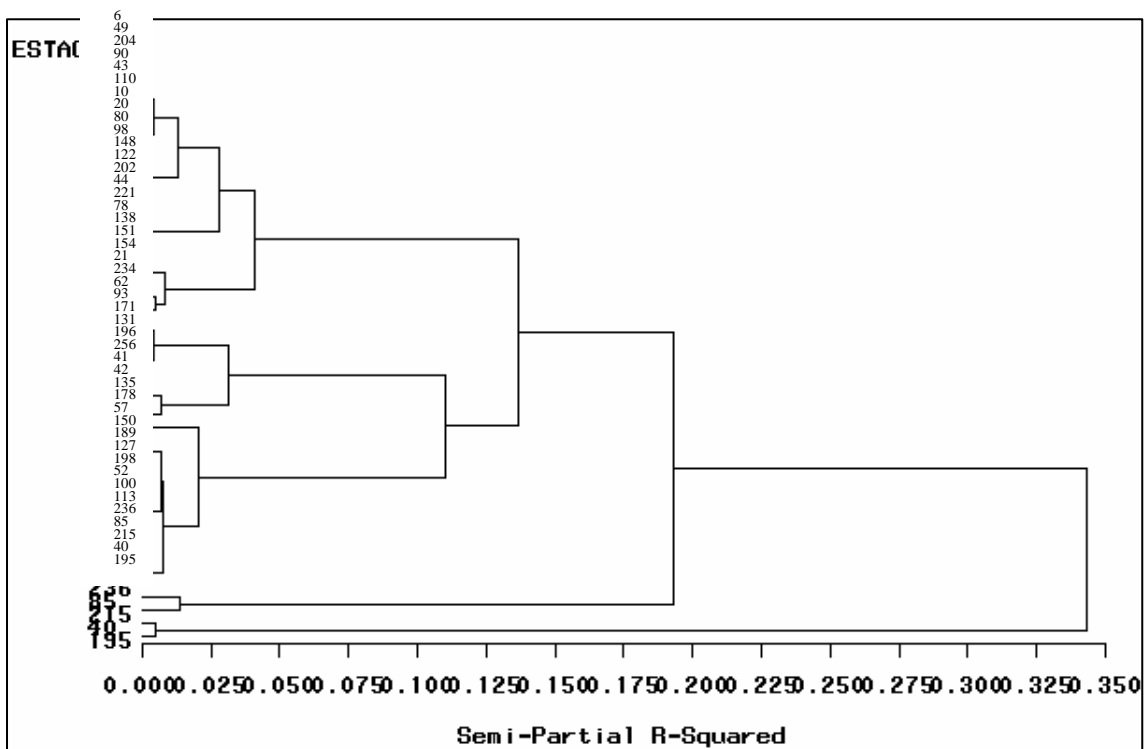
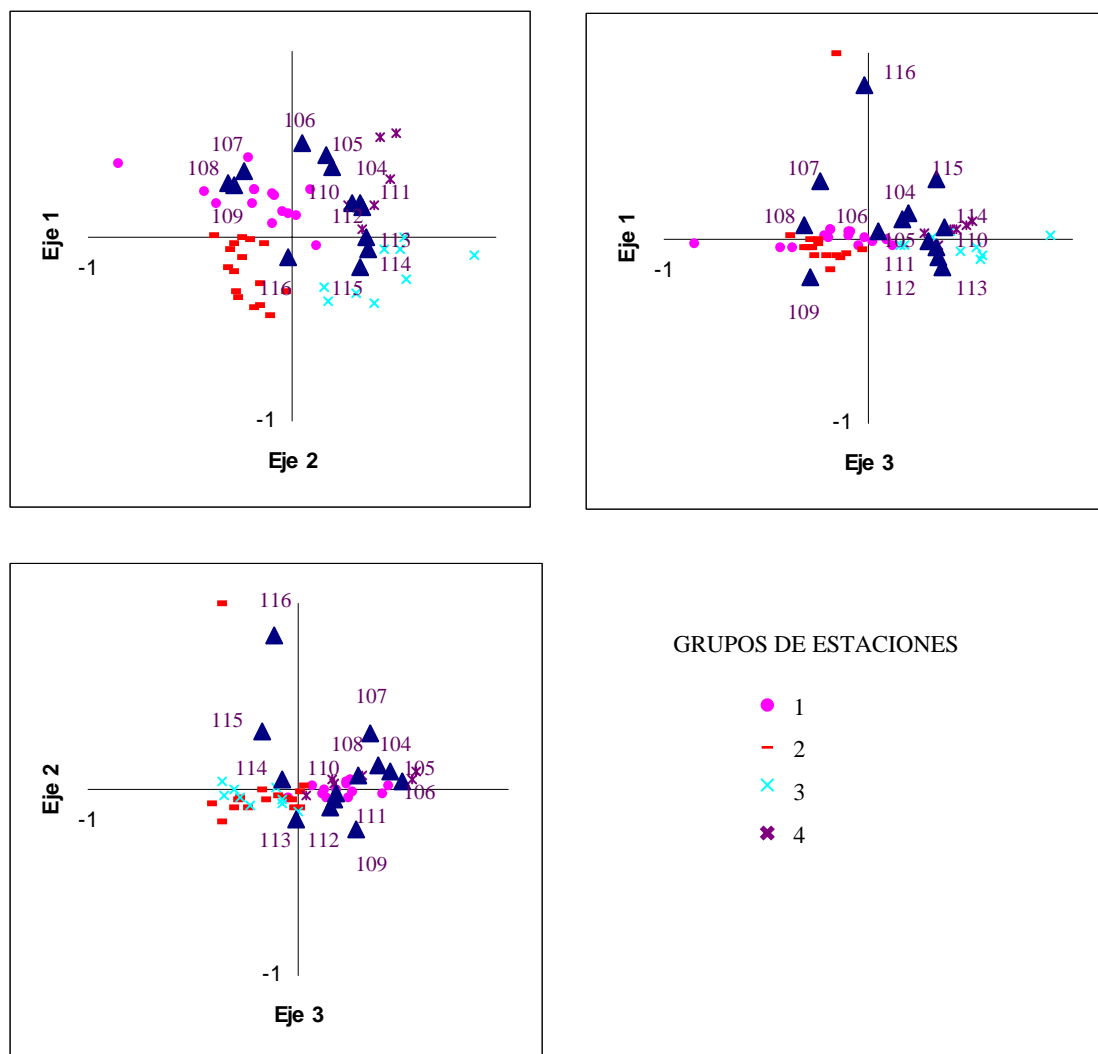


Figura 4.2.9. Análisis tipo cluster realizado tomando como variables las coordenadas de las estaciones sobre los tres ejes resultado del análisis de componentes principales (Figura 4.2.7).

#### 4.2.1.4 Análisis en función de variables resultado del análisis de periodos de caudales mínimos

Los resultados del análisis de componentes principales realizado sobre el conjunto de variables resultado del análisis de periodos de caudales mínimos se muestran en la Figura 4.2.10.



▲ VARIABLES:

- |   |   |
|---|---|
| 104: frecuencia de caudales < 5% del módulo       | 111: nº días consecut. con caudal < 10% del módulo            |
| 105: frecuencia de caudales < 10% del módulo      | 112: nº días consecut. con caudal < 20% del módulo            |
| 106: frecuencia de caudales < 20% del módulo      | 113: nº días consecut. con caudal < 40% del módulo            |
| 107: frecuencia de caudales < 40% del módulo      | 114: nº días consecut. con caudal < 60% del módulo            |
| 108: frecuencia de caudales < 60% del módulo      | 115: nº días consecut. con caudal < 80% del módulo            |
| 109: frecuencia de caudales < 80% del módulo      | 116: agua necesaria para mantener los caudales >5% del módulo |
| 110: nº días consecut. con caudal < 5% del módulo |   |

Figura 4.2.10. Resultados del análisis de componentes principales para las variables descriptoras de la hidrología general donde se muestran tanto el peso de las variables (triángulos azules) sobre los ejes

como las coordenadas de las estaciones (agrupadas según los resultados del análisis de cluster de la Figura 4.2.12) sobre los mismos. La suma del porcentaje de varianza explicado por los ejes es del 82%.

El eje 1 explica el 47% de la varianza, y separa las estaciones en función de la longitud del período con caudales circulantes por debajo de un valor prefijado. Estaciones con valores altos de este eje presentan largos períodos con caudales por debajo de un valor prefijado, mientras que en estaciones con valores bajos los períodos de caudales por debajo de un valor prefijado son de poca duración.

El eje 2 explica el 25% de la varianza, y separa las estaciones en función del número de ocasiones (período de días consecutivos) en que los caudales circulantes están por debajo del 20% del caudal medio anual. Valores altos de este eje indican que en muchas ocasiones, independientemente de la longitud del período, los caudales circulantes están por debajo de ese valor prefijado, mientras que en estaciones situadas en zonas con valores bajos de este eje los caudales circulantes no suelen estar por debajo de ese valor, al menos en cuanto al número de ocasiones se refiere.

El eje 3 explica el 10% de la varianza, y refleja la cantidad de agua que se requeriría para mantener los caudales circulantes por encima de un porcentaje del caudal medio anual prefijado. Valores altos de este eje indican que gran parte del tiempo los caudales circulantes son muy inferiores al valor prefijado. Por el contrario, valores bajos indican que los caudales circulantes no suelen ser inferiores al valor prefijado.

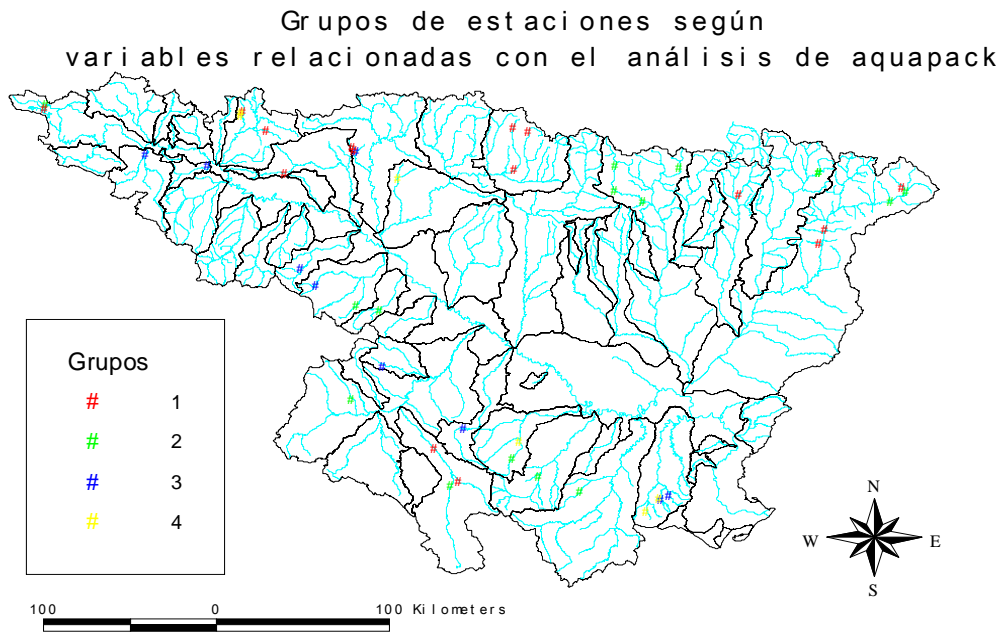
Como resultado del análisis de componentes principales (Figura 4.2.10) y del análisis de cluster realizado a partir de los mismos (Figura 4.2.12), se han identificado cuatro grupos de estaciones (Figura 4.2.11). Así, en el grupo 1 están incluidas las estaciones en las que los caudales circulantes están en muchas ocasiones por debajo del 20% del caudal medio anual, aunque con unos valores que no se alejan mucho de ese porcentaje y por unos períodos de tiempo pequeños.

El grupo 2 incluye estaciones en las que los caudales circulantes están pocas veces por debajo del 20% del caudal medio anual y por unos períodos de tiempo pequeños.

En el grupo 3 se incluyen las estaciones en las que los caudales circulantes están pocas veces por debajo del 20% del caudal medio anual, pero por períodos de tiempo dilatados y con valores de caudales que se alejan de ese porcentaje.

Por último, el grupo 4 incluye las estaciones en las que los caudales circulantes están muchas veces por debajo del 20% del caudal medio anual y lo hacen por períodos de tiempo dilatados. Es decir, son estaciones donde los caudales son frecuentemente bajos, con unas pocas crecidas extraordinarias al año.

Figura 4.2.11. Distribución de los cuatro grupos de estaciones obtenidos a través de los resultados del



análisis de componentes principales y del análisis cluster realizado sobre los mismos.

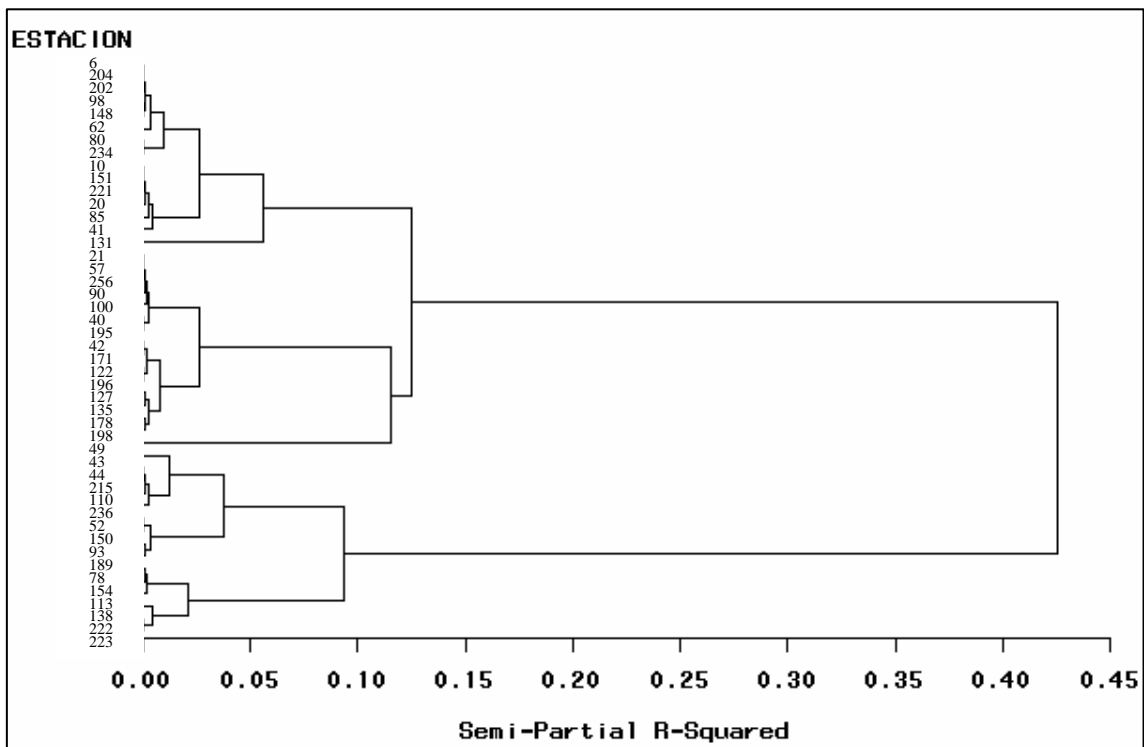
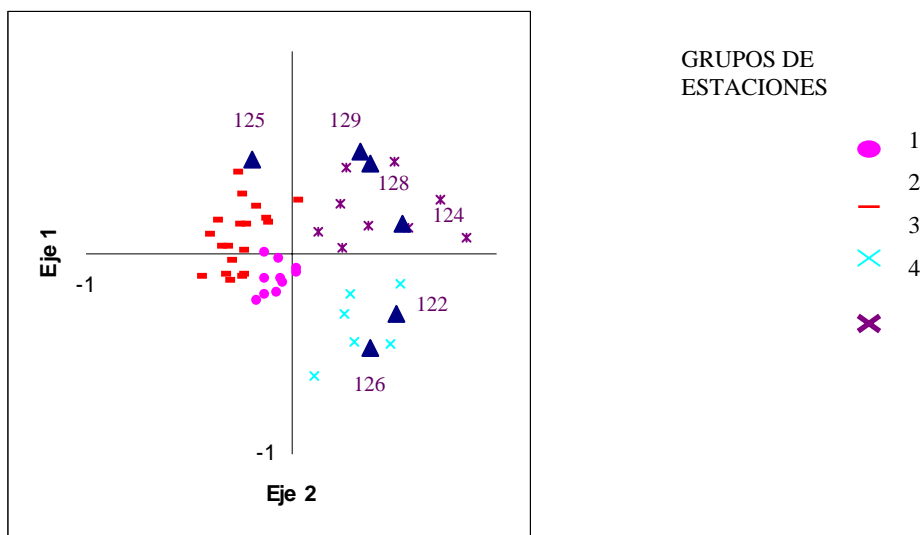


Figura 4.2.12. Análisis tipo cluster realizado tomando como variables las coordenadas de las estaciones sobre los tres ejes resultado del análisis de componentes principales (Figura 4.2.10).

#### 4.2.1.5 Análisis en función de variables que expresan variabilidad

Los resultados del análisis de componentes principales realizado sobre el conjunto de variables que expresan variabilidad de caudales se muestran en la Figura 4.2.13.



▲ VARIABLES:

- 122: Coeficiente de Variación de caudales medios diarios
- 124: Coeficiente de variación intraanual de caudales medios diarios
- 125: Desviación Standard media de caudales medios diarios
- 126: Coeficiente de Variación interanual de caudales medios diarios
- 128: Índice de variabilidad calculado como raíz cuadrada de (Q25% / Q75%)
- 129: Índice de variabilidad calculado como (Q10% - Q90%) / mediana

Figura 4.2.13. Resultados del análisis de componentes principales para las variables descriptoras de la variabilidad de caudales donde se muestran tanto el peso de las variables (triángulos azules) sobre los ejes como las coordenadas de las estaciones (agrupadas según los resultados del análisis de cluster de la Figura 4.2.15) sobre los mismos. La suma del porcentaje de varianza explicado por los ejes es del 67%.

El eje 1 explica el 45% de la varianza, y nos separa las estaciones en base al coeficiente de variación de los caudales diarios. Valores altos de este eje corresponden a estaciones con coeficientes de variación altos, que puede ser causado por un caudal medio pequeño, o bien por una desviación típica muy grande respecto al caudal medio. En contra, valores negativos reflejan estaciones con coeficientes de variación pequeños, bien sea por desviaciones típicas pequeñas (valores próximos a la media) o por valores de caudales medios grandes.

El eje 2 explica el 22% de la varianza, y clasifica las estaciones en función de la amplitud de sus regímenes de caudales. Así, valores altos en este eje corresponden a estaciones con un régimen de caudales donde la diferencia entre los caudales mínimos y los máximos es grande (Q25% y Q10% altos respecto a Q75% y Q90%), es decir, ríos con carácter mediterráneo y/o intermitentes. Por el contrario, valores bajos en este eje corresponden a estaciones con unos caudales próximos a los medios.

Como resultado del análisis de componentes principales (Figura 4.2.13) y del análisis de cluster realizado a partir de los mismos (Figura 4.2.15), se han identificado cuatro grupos de estaciones (Figura 4.2.14). Así, en el grupo 1 están incluidas las estaciones con coeficiente de variación de caudales bajo y amplitud de caudales pequeña, es decir, un régimen equilibrado en cuanto a porcentajes relativos de caudales altos y bajos con pocas desviaciones sobre la media. Las estaciones incluidas en el grupo 2 también tienen unos coeficientes de variación de caudales pequeño, aunque la amplitud de caudales es mayor, por lo que tienen un régimen de caudales medios relativamente altos.

El grupo 3 incluye estaciones con un régimen en el que predominan los caudales circulantes bajos, donde el coeficiente de variación es elevado a pesar de que el rango de amplitud de caudales no es muy grande.

En el grupo 4 se incluyen estaciones con un régimen anual de caudales con grandes desviaciones sobre la media, con coeficientes de variación grandes y amplitudes en el rango de caudales también elevadas.

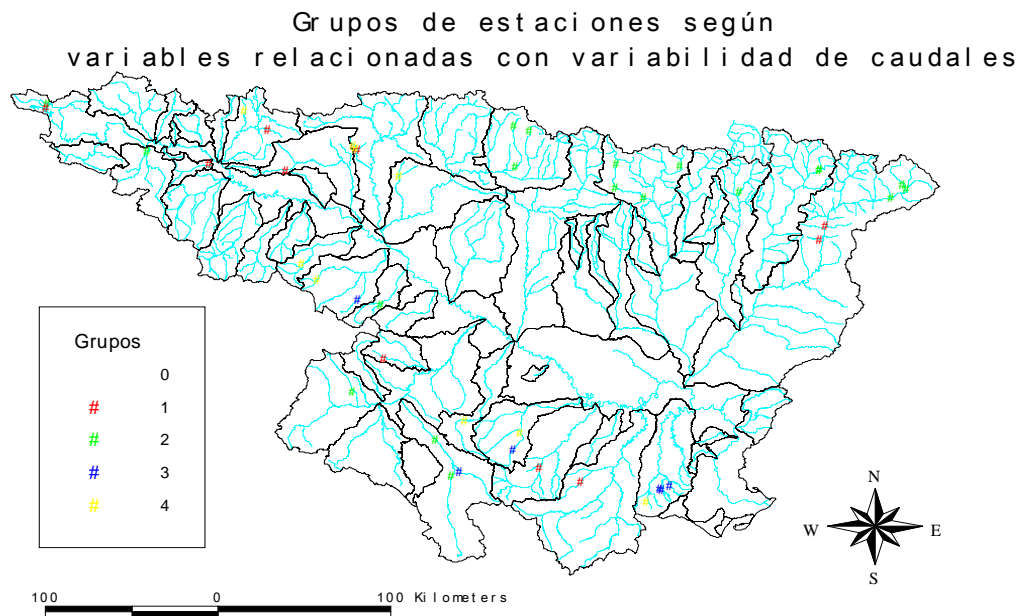


Figura 4.2.14. Distribución de los cuatro grupos de estaciones obtenidos a través de los resultados del análisis de componentes principales y del análisis cluster realizado sobre los mismos.



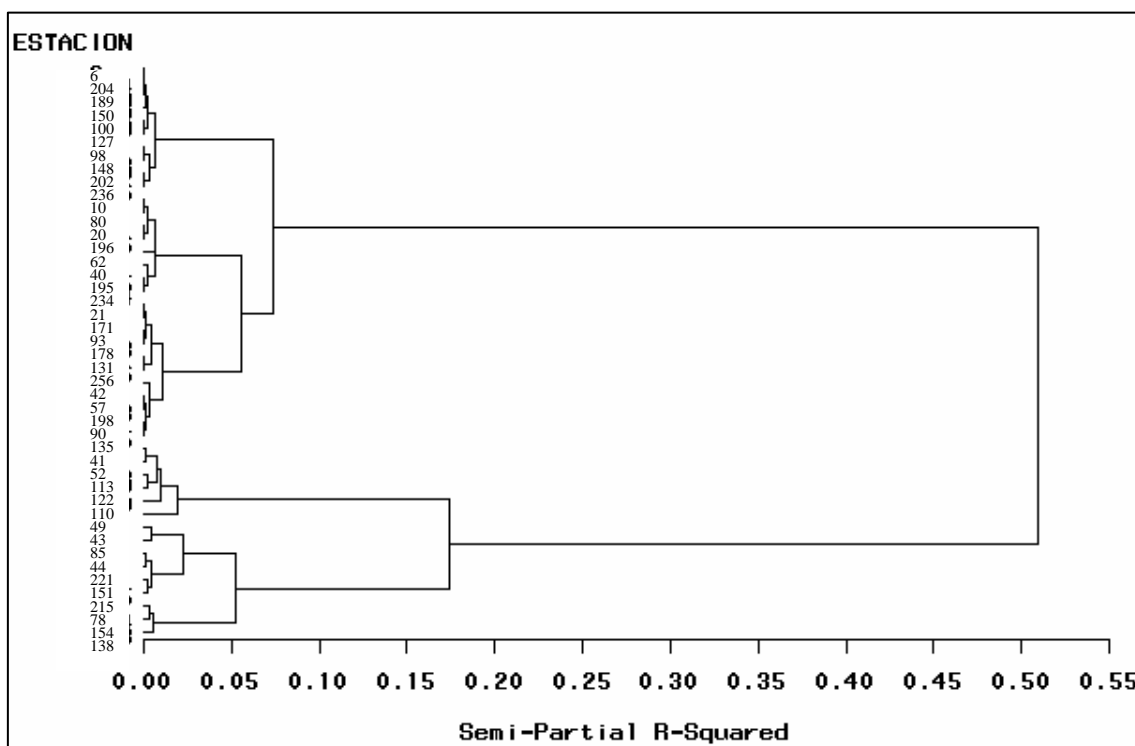


Figura 4.2.15. Análisis tipo cluster realizado tomando como variables las coordenadas de las estaciones sobre los tres ejes resultado del análisis de componentes principales (Figura 4.2.13).

#### **4.2.1.6 Regionalización global**

Una vez analizadas las estaciones por grupos de variables, se ha realizado un análisis cluster para obtener los grupos globales de estaciones que sirvan para la zonificación de la cuenca del Ebro tomando como nuevas variables los ejes que resultaron del análisis de componentes principales por grupos de variables. Esta zonificación no se ha extendido a la totalidad de la cuenca del Ebro, sino que se ha restringido a una zona de aplicación de los resultados en función de las características y premisas consideradas en los datos de partida (estaciones de aforo en régimen natural) tal y como se detalla más adelante.

Al existir valores en blanco de algunas estaciones de aforo (cinco en total) para algunas variables no se pudieron analizar todas las estaciones a la vez. Así, se han analizado primero el grupo de estaciones que tenían una matriz completa de valores respecto a la totalidad de variables (Figura 4.2.16), y a continuación la totalidad de estaciones respecto a las variables en las que sí tomaban valor (Figura 4.2.17). De esta forma se pudo ver la afinidad de estas cinco estaciones con las demás y encuadrarlas en uno de los grupos obtenidos del análisis anterior.

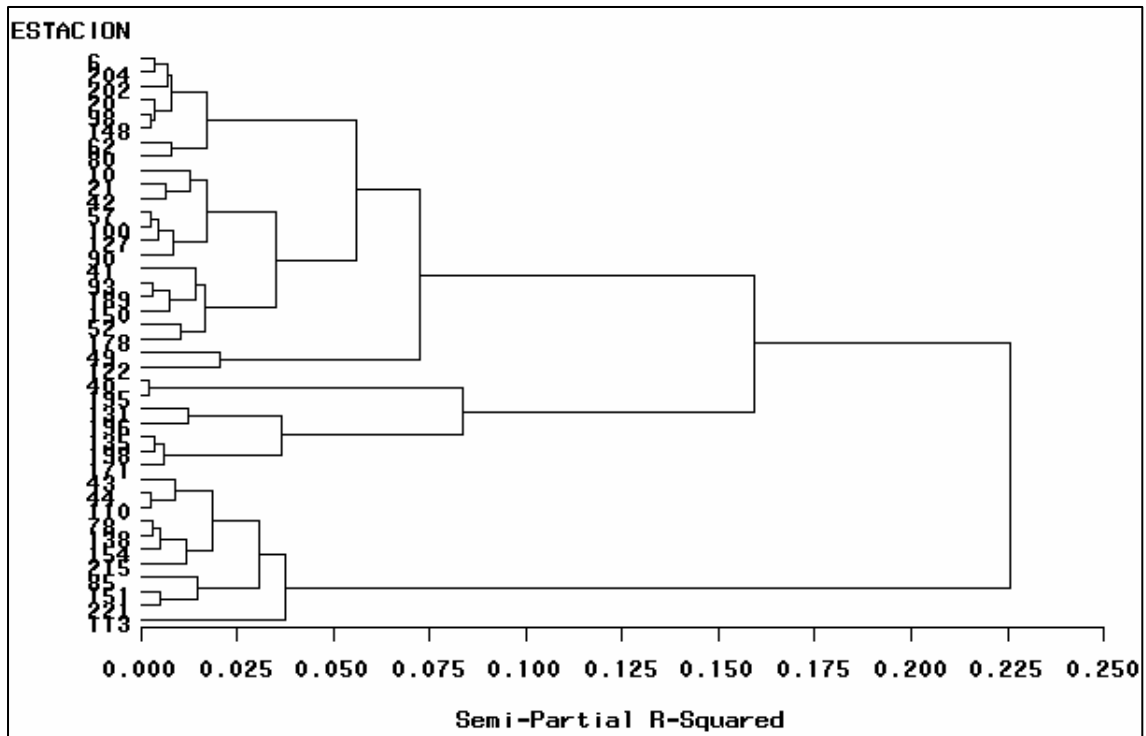


Figura 4.2.16. Resultados del análisis cluster excluyendo las estaciones que presentan valores en blanco para algunas variables.

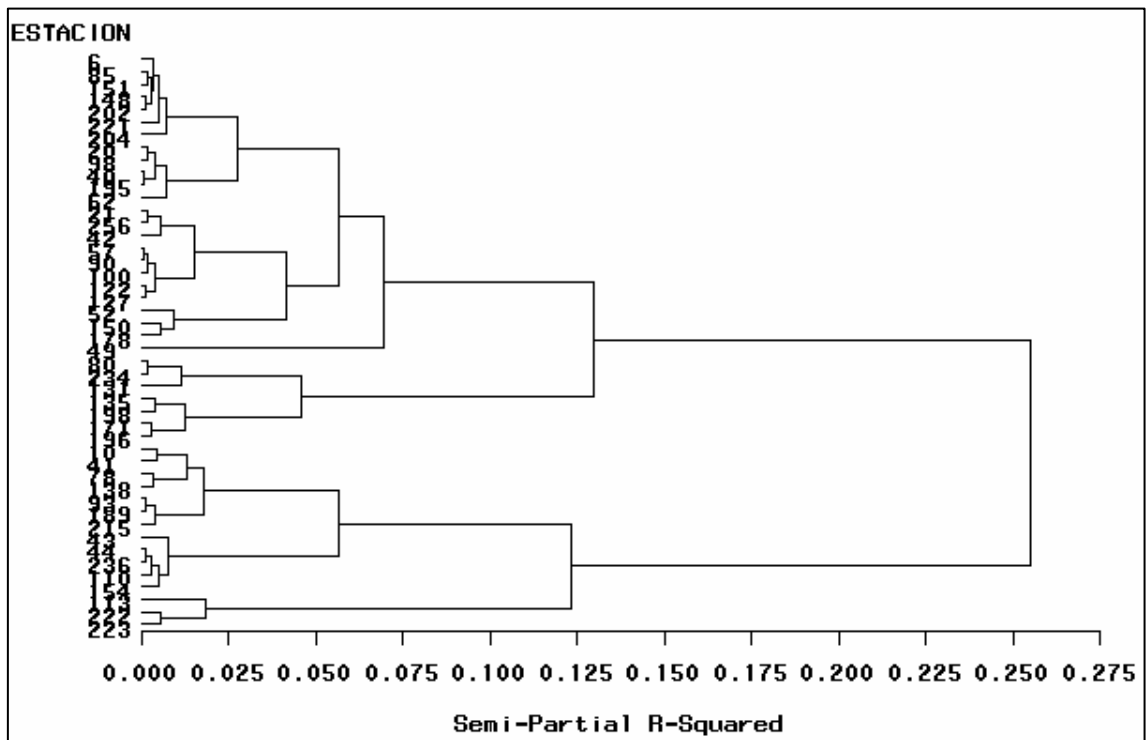


Figura 4.2.17. Resultados del análisis cluster excluyendo las variables que presentan valores en blanco para alguna estación.

De los resultados de estos análisis se obtuvieron cuatro grupos de estaciones (Figura 4.2.18). En el primer grupo se encuentran cuencas de orografía abrupta con una altitud media elevada y con una capacidad máxima de humedad del suelo pequeña, lo que refleja escasa vegetación, o vegetación de tipo arbustivo, y elevados coeficientes de escorrentía. Son cuencas de alta montaña, de régimen nival, situadas en cabecera del Pirineo. Estas cuencas presentan unos caudales más o menos constantes a lo largo del año, con pequeñas variaciones estacionales que se suelen producir de forma constante a lo largo de los años. Estas estaciones presentan unos caudales medios relativamente elevados por ser ríos de bajo orden, sin la presencia de mínimos acusados.

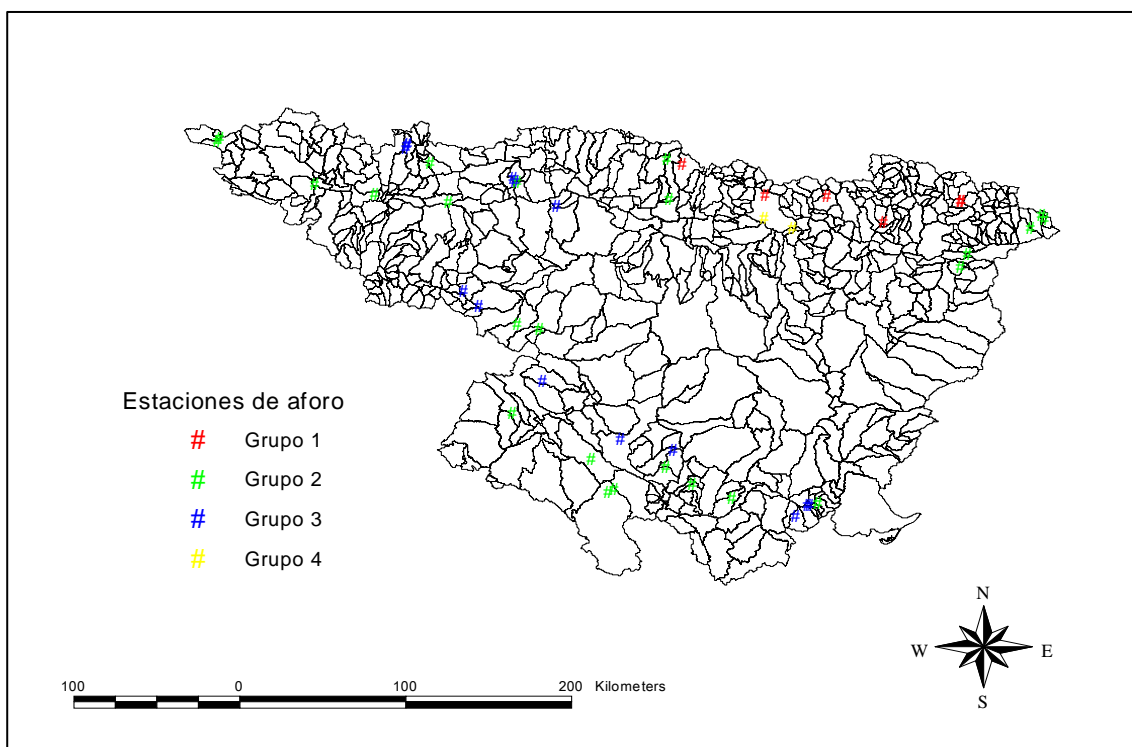


Figura 4.2.18. Grupos de estaciones de aforo obtenidos.

En el grupo 2 se incluyen estaciones situadas en zonas de cabecera del oeste y sur de la cuenca del Ebro, así como cuencas también montañosas pero localizadas por debajo de las del grupo 1. Agrupa por un lado a cuencas relativamente grandes, de montaña húmeda con caudales más o menos elevados y con baja variabilidad temporal, con una curva de caudales clasificados equilibrada, y por otro lado a cuencas de montaña mediterránea con una marcada variabilidad anual de caudales, donde predominan los caudales bajos a pesar de tener un coeficiente de variación de caudales no muy alto y una amplitud de caudales pequeña. Se corresponden normalmente con cuencas con alta capacidad máxima de humedad del suelo y de infiltración debidas a un alto porcentaje de superficie forestal arbórea.

El grupo 3 engloba a estaciones situadas normalmente por debajo de las del grupo 2 (menor altitud media) en zonas con altos porcentajes de superficie forestal, y por tanto normalmente con altas capacidades de infiltración y de humedad del suelo. Incluye cuencas de montaña con una tendencia mediterránea. Así, presentan una marcada variabilidad anual de caudales con grandes desviaciones sobre la media (coeficientes de variación grandes y amplitudes de rango elevadas), con unos caudales circulantes que se

sitúan en muchas ocasiones por debajo del 20% del caudal medio anual y por periodos de tiempo dilatados, unidos a unas pocas crecidas.

En el grupo 4 se incluyen únicamente a dos estaciones (situadas en el río Ara, afluente del río Cinca) que se diferencian del resto por presentar los mayores caudales medios y mínimos, con una cierta variabilidad a lo largo del año e incluso entre años. Los caudales circulantes están pocas veces por debajo del 20% el caudal medio anual y por unos períodos pequeños. Los coeficientes de variación de caudales son pequeños, a pesar de la variabilidad estacional, debido a que el régimen de caudales medios es relativamente alto. Se encuentran localizadas en cuencas permeables con gran capacidad máxima de infiltración (zonas calizas o materiales arenosos) y alto porcentaje de superficie forestal.

Para proceder a una zonificación de la cuenca del Ebro en función de estos grupos, lo primero que hay que hacer es delimitar el área de aplicación de dicha zonificación. Existen tramos fluviales que se encuentran altamente modificados y condicionados por actividades antrópicas tanto en su régimen hidrológico como en algunos casos en su estructura y composición de cauce y ribera, por lo que en estos tramos no tendría sentido proponer unos caudales de mantenimiento a partir de un régimen de caudales naturales. Para la delimitación de esta zona de aplicación se probaron una serie de criterios sin obtener buenos resultados, como por ejemplo utilizar un coeficiente para determinar las estaciones de aforo con caudales próximos a los naturales (caudal circulante /caudal natural restituído por la C.H.E.), pero sin obtener ningún patrón determinado sino una distribución aleatoria de los valores de dicho coeficiente. Finalmente se adoptaron tres criterios para determinar la zona de exclusión (Figura 4.2.19):

- Eje central del río Ebro. Corresponde a la región 5 (Eje del Ebro) de la delimitación de regiones ecológicas de la cuenca del Ebro realizada por la Confederación Hidrográfica del Ebro (OPHCHE, 1999), y que va desde la afluencia del Alagón y el Alhama, justo antes de Tudela, hasta su desembocadura en el Delta del Ebro.
- Cota de altitud 468. Se ha excluido de la zona de aplicación toda la superficie con una cota inferior a 468 m ya que no existe ninguna estación de aforo de las seleccionadas por debajo de esa altitud, y por lo tanto se ha considerado que los resultados obtenidos no deben ser extrapolados a unas altitudes diferentes a las de los datos de base.
- Zona alterada. Se han excluido los tramos de ríos situados por debajo de grandes embalses o grandes obras de regulación de caudales, ya que estos tramos fluviales se encuentran altamente modificados y condicionados por actividades antrópicas tanto en su régimen hidrológico como en algunos casos en su estructura y composición de cauce y ribera.

En esta zona de exclusión de tramos alterados la determinación de los caudales de mantenimiento puede que no se obtenga a partir de la aplicación únicamente de un método hidrológico como el analizado en este estudio, sino que debe responder a una visión más holística donde se tengan en cuenta todo tipo de consideraciones ecológicas, sociales y económicas. Así, habría que hacer un estudio particular para cada caso.

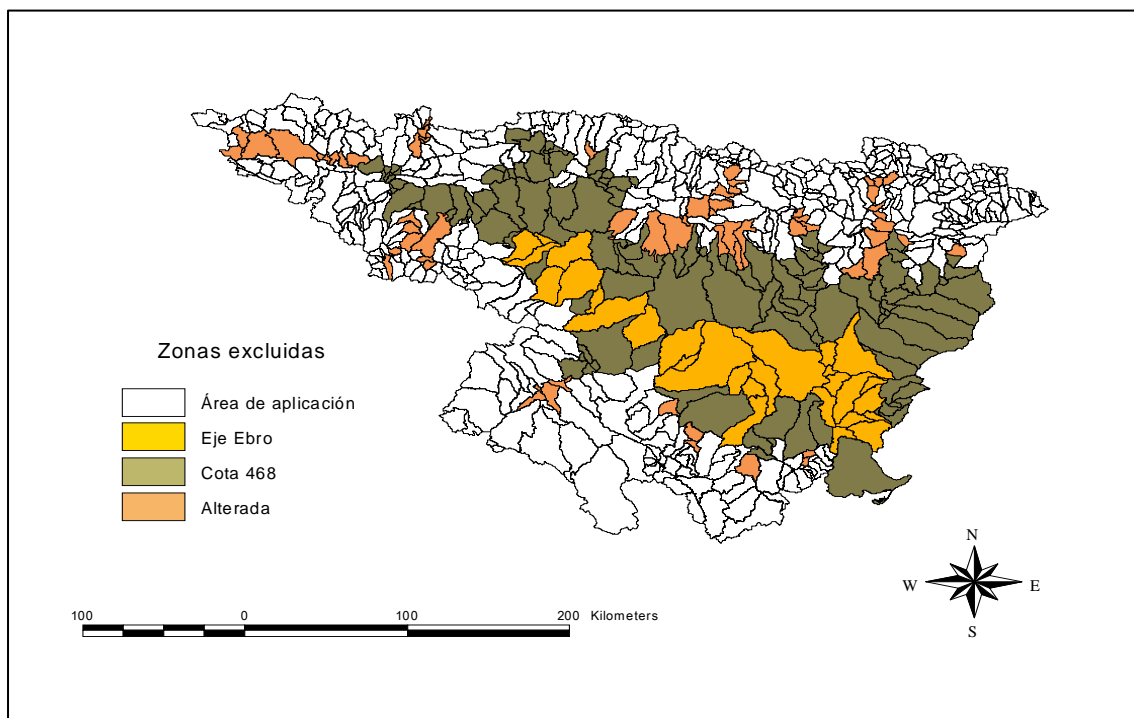


Figura 4.2.19. Zonas de exclusión en la regionalización de la cuenca del Ebro.

Una vez definida la zona de aplicación de resultados, se ha asociado a cada estación la cuenca vertiente delimitada por la misma o en la que se encuentra ubicada. En la Figura 4.2.20 se muestran los grupos de estaciones obtenidos, además de las cuencas que corresponden directamente a cada grupo, así como su zona de influencia según la definición de los grupos.

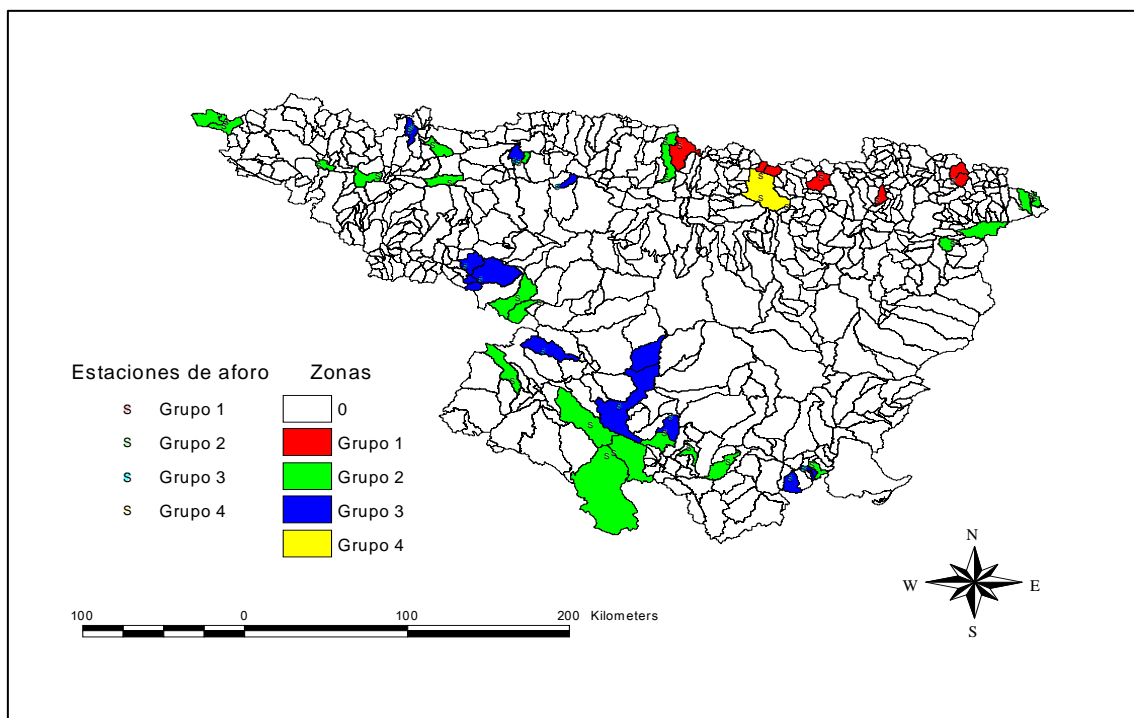


Figura 4.2.20. Grupos de estaciones obtenidos y cuencas que corresponden directamente a cada grupo, así como su zona de influencia.

Por otro lado, la agrupación de estaciones obtenida se ha contrastado con la delimitación de regiones ecológicas de la cuenca del Ebro realizada por la Confederación Hidrográfica del Ebro (OPHCHE, 1999). Como se puede observar en la Figura 4.2.21 y la Tabla 4.2.1, la mayoría de las estaciones de los grupos 2 y 3 (54% y 64% respectivamente) se encuentran localizadas en la región ecológica 4 que corresponde a la montaña mediterránea, encontrándose también algunas estaciones sobre todo del grupo 2 (pero ya en número significativamente inferior) en las regiones de montaña húmeda (región 1) y de depresión (región 3). La totalidad de las estaciones del grupo 1 se encuentran en la región 6 de alta montaña.

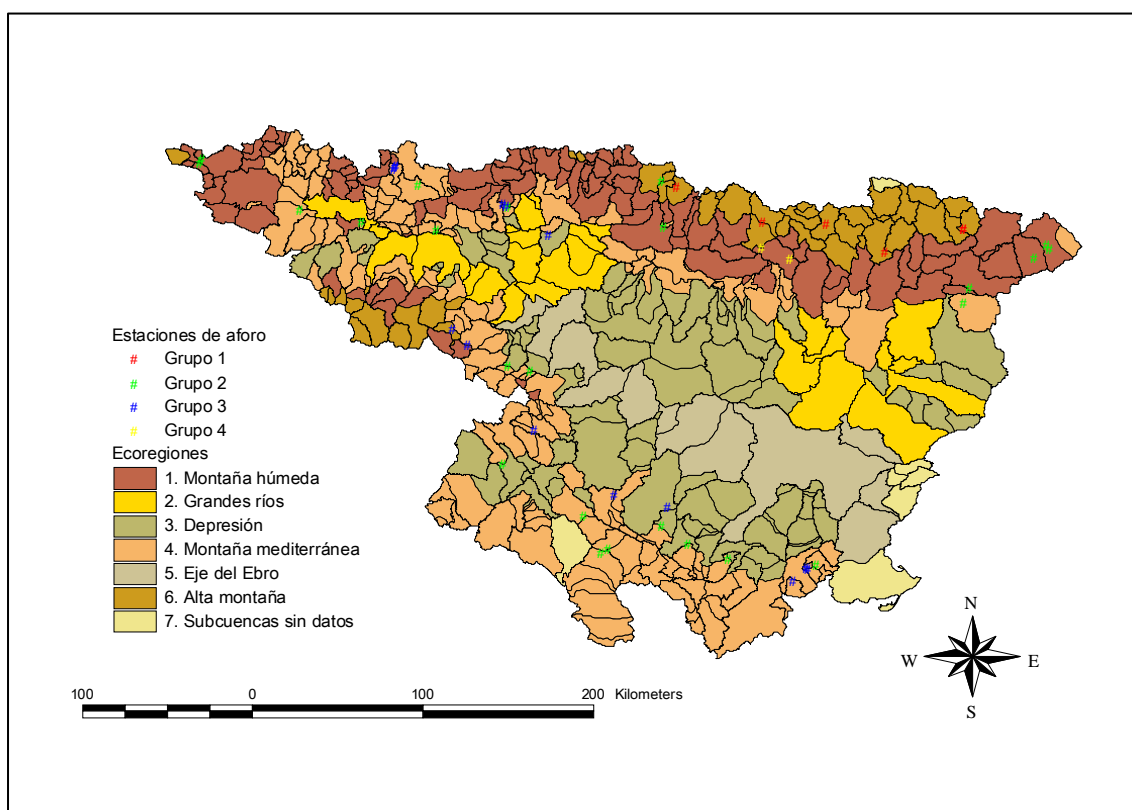


Figura 4.2.21. Localización de los grupos de estaciones en las distintas regiones ecológicas definidas por la C.H.E. Fuente: OPHCHE, 1999.

Tabla 4.2.1. Relación del número de estaciones que se localizan en cada región ecológica definida por la Confederación Hidrográfica del Ebro en función del grupo al que pertenecen.

Ecoregiones CHE	Resultados de la zonificación			
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
1. Montaña húmeda		6 (25%)	2 (14%)	1 (50%)
2. Grandes ríos				
3. Depresión		4 (17%)	2 (14%)	
4. Montaña mediterránea		13 (54%)	9 (64%)	
5. Eje del Ebro				
6. Alta montaña	6 (100%)	1 (4%)	1 (7%)	1 (50%)
7. Subcuencas sin datos				

Finalmente, se ha obtenido una zonificación general de la cuenca del Ebro en los cuatro grupos definidos anteriormente, extrapolando los resultados de la Figura 4.2.20 a las subcuencas vertientes a las que pertenecen, teniendo en cuenta que para las zonas donde no se tienen datos se han tenido en cuenta también criterios de similitud altitudinal y de proximidad, así como similitud de regiones hidrográficas según la delimitación de regiones ecológicas de la cuenca del Ebro realizada por la Confederación Hidrográfica del Ebro (OPHCHE, 1999).

Así, el grupo 4 incluye la subcuenca del río Ara donde se ubican las dos estaciones de aforo de ese grupo. Las subcuencas pertenecientes a la ecoregión de Depresión, así como las de carácter más seco o mediterráneo (ecoregión Montaña mediterránea) se han asociado en general al grupo 3, mientras que las subcuencas más húmedas (correspondientes a la ecoregión Montaña húmeda) y subcuencas con una marcada dirección norte-sur se han asociado al grupo 2. Por último, las subcuencas correspondientes a la alta montaña de la zona pirenaica se han asociado al grupo 1.

En la Figura 4.2.22 se muestra la zonificación final de la cuenca del Ebro, que no pasa de ser, como se ha explicado con anterioridad, una extrapolación de los resultados obtenidos mediante unos criterios que pueden ser discutibles, y sirve simplemente para ver las grandes regiones de la cuenca del Ebro en cuanto a su comportamiento hidrológico teniendo en cuenta únicamente parámetros relacionados con los caudales de mantenimiento. Como se puede apreciar, en la margen izquierda las subcuencas del grupo 1 corresponden a la alta montaña pirenaica. Por debajo de ellas se sitúan las subcuencas del grupo 2 también en zona de montaña húmeda, bajando en latitud en la parte central de la cuenca del Ebro. Finalmente el grupo 3 incluye las subcuencas de una altitud menor (zona interior de la cuenca del Ebro) y/o con un marcado carácter mediterráneo (zona oriental de la cuenca del Ebro) situadas por debajo del grupo 2. En la margen derecha encontramos un patrón similar, con las subcuencas del grupo 2 ocupando las cabeceras de los ríos que nacen en el Sistema Ibérico (aquí no encontramos subcuencas del grupo 1 al no existir condiciones de alta montaña similares a la zona pirenaica), y las subcuencas del grupo 3 localizadas inmediatamente por debajo de las mismas a una menor altitud. Como se ha comentado anteriormente, el grupo 4 está presente en una única subcuenca (la del río Ara) con unas características hidrológicas particulares (mayores caudales medios y mínimos, con una cierta variabilidad a lo largo del año e incluso entre años).

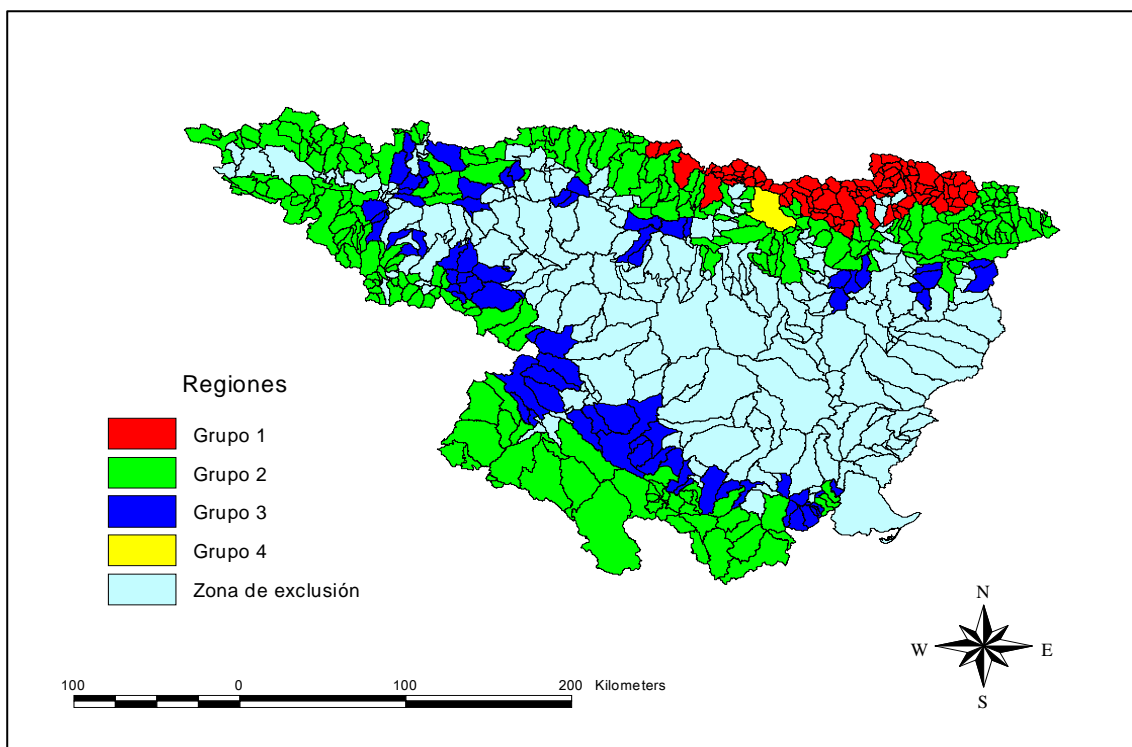


Figura 4.2.22. Mapa con la zonificación final de la cuenca del Ebro.

#### 4.2.2 DETERMINACIÓN DEL QB EN LAS DISTINTAS ZONAS HOMOGÉNEAS

Sobre tres de los cuatro grupos de estaciones que conforman las distintas zonas identificadas en la cuenca del Ebro se ha realizado un análisis de regresión para ver qué variables y en qué medida contribuyen a la predicción de los caudales básicos (el grupo cuatro no se incluyó en el análisis al contar únicamente con dos estaciones). Para ello se realizó un análisis de correlación entre el Qb y las demás variables, escogiendo en una primera fase la mejor correlacionada. A continuación, se realizó un segundo análisis de correlación parcial controlando la influencia de la primera variable escogida, escogiendo una segunda variable y viendo el coeficiente de correlación del modelo con las dos variables introducidas. Este proceso se repitió hasta conseguir un modelo lo más parsimonioso posible, es decir, conseguir la máxima explicación de Qb con el menor número de variables en el modelo. Los resultados se muestran a continuación.

##### Grupo 1:

Paso 1.

Variable mejor correlacionada con Qb: X27 (R=0.99284; Pr=0.0001; n=6)

Modelo:

$$Qb = 0.01902 + 0.33771X_{27} \quad (R^2 = 0.9857)$$

Paso 2.



Variable mejor correlacionada con Qb una vez controlada la influencia de la variable X27 (correlación parcial): X13 (R=0.99511; Pr=0.0049; n=5)

Modelo:

$$Qb = -0.16841 + 0.336731X27 + 0.00748X13 \quad (R^2 = 0.9863)$$

donde:

X27: Caudal igualado o superado durante 347 días al año (Q347)

X13: Pendiente media de la cuenca

### Grupo 2:

Paso 1.

Variable mejor correlacionada con Qb: X27 (R=0.89377; Pr=0.0001; n=24)

Modelo:

$$Qb = 0.07041 + 0.25755X27 \quad (R^2 = 0.7988)$$

Paso 2.

Variable mejor correlacionada con Qb una vez controlada la influencia de la variable X27 (correlación parcial): X15 (R=0.59703; Pr=0.0034; n=23)

Modelo:

$$Qb = -0.42744 + 0.27411X27 + 0.31383X15 \quad (R^2 = 0.8611)$$

donde:

X27: Caudal igualado o superado durante 347 días al año (Q347)

X15: Índice de compacidad de Gravelius

Paso 3.

Variable mejor correlacionada con Qb una vez controlada la influencia de las variables X27 y X15 (correlación parcial): X6 (R=-0.42144; Pr=0.0571; n=23)

Esta última variable presenta una correlación baja con Qb y una probabilidad mayor de 0.05, luego no entraría ninguna variable más al modelo.

### Grupo 3:

Paso 1.

Variable mejor correlacionada con Qb: X24 ( $R=0.97132$ ;  $Pr=0.0001$ ;  $n=14$ )

Modelo:

$$Qb = 0.00096874 + 0.86577X_{24} \quad (R^2 = 0.9435)$$

Paso 2.

Variable mejor correlacionada con Qb una vez controlada la influencia de la variable X27 (correlación parcial): X26 ( $R=-0.67213$ ;  $Pr=0.0333$ ;  $n=11$ )

Modelo:

$$Qb = 0.00247 + 0.97421X_{24} - 0.00382X_{26} \quad (R^2 = 0.9453)$$

donde:

X24: Promedio para todos los años de los mínimos de caudales medios mensuales ( $Q_{minx}$ )

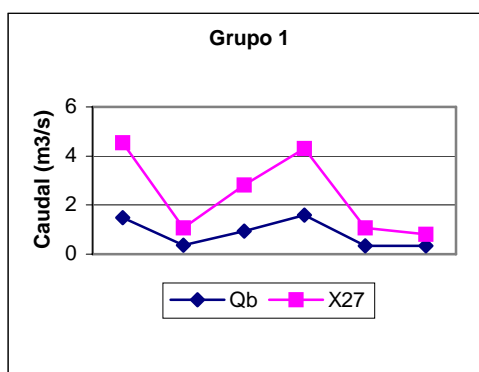
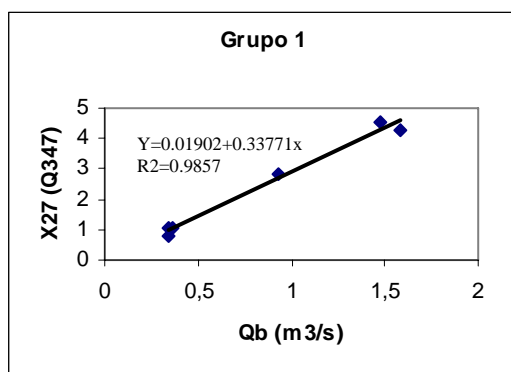
X26: Caudal igualado o superado durante 90 días al año ( $Q_{90}$ )

#### 4.2.2.1 Discusión

Se ha escogido para la elaboración de los modelos un análisis de correlación paso a paso en lugar de otros procedimientos estadísticos (por ejemplo *stepwise*, *forward selection*) para optimizar el tamaño de la muestra en cada paso, debido a que la base datos a analizar tienes dos problemas: el alto número de variables respecto al número de observaciones, y el hecho de que existen valores no definidos en algunas estaciones para algunas variables.

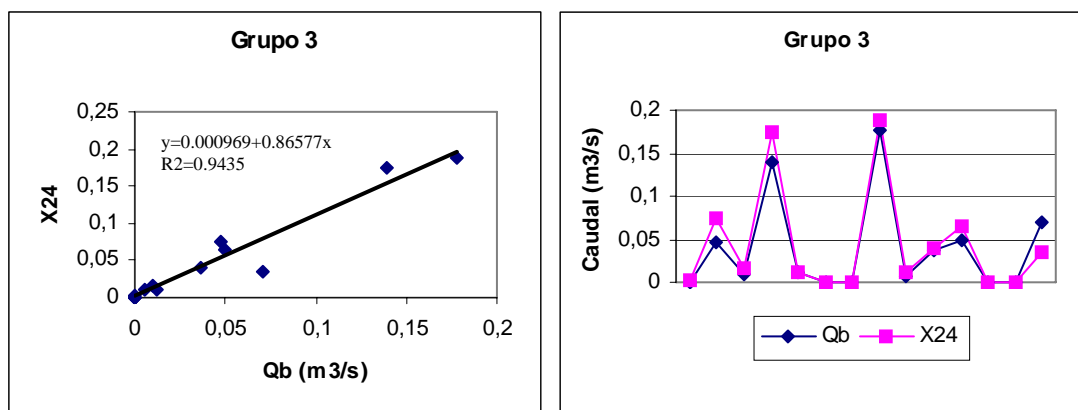
Como se puede apreciar, la entrada de una segunda variable no aporta prácticamente nada al coeficiente de determinación de los modelos de los grupos 1 y 3, por lo que estos quedarían definidos únicamente por una variable, la cual aportaría suficiente explicación a los modelos ( $R^2=0.98$  y  $R^2=0.94$  respectivamente). Así, el Qb se puede determinar en las distintas regiones de la cuenca del Ebro a partir de las siguientes variables:

Región 1: Caudal igualado o superado durante 347 días al año ( $Q_{347}$ )



Región 2: Índice de compacidad de Gravelius y Caudal igualado o superado durante 347 días al año (Q347)

Región 3: Promedio para todos los años de los mínimos de caudales medios mensuales



Estos resultados son coherentes con otras metodologías existentes de cálculo de caudales de mantenimiento, ya que la variable Q347 que aparece como independiente en este estudio en los modelos de determinación de Qb de dos grupos de estaciones, también se utiliza en algunas metodologías hidrológicas para el cálculo del caudal ecológico (por ejemplo en las fórmulas de Matthey y asociadas; UNESA, 1993).

No obstante, estos resultados hay que tomarlos con mucha prudencia y siempre dentro del contexto de este estudio ya que debido al gran número de variables analizadas respecto al número de estaciones y a la relativamente alta correlación existente entre muchas de ellas y el Qb (no hay que olvidar que ya se escogieron variables que tuvieran que ver en la explicación de los caudales mínimos), el variar el número de observaciones, aunque sea mínimamente, puede dar lugar a unos resultados distintos.

#### 4.2.3 APLICACIÓN PRÁCTICA DE DETERMINACIÓN DEL QB EN LA CUENCA DEL EBRO

Por último, se ha hecho una aproximación a la determinación de caudales de mantenimiento desde un punto de vista más práctico, ya que los resultados de la anterior clasificación de los grupos se basa en un análisis de variables que se han calculado expresamente para este estudio, y que en la mayoría de los casos en las estaciones de aforo no se dispone de los valores de dichas variables al menos de una forma directa. Por ello, se ha hecho una interpolación de los valores de caudales de mantenimiento calculados para las estaciones seleccionadas en la cuenca del Ebro por el método de la ponderación por el inverso de la distancia (Inverse Distance Weighted, IDW) (Watson y Philip, 1985), de manera que a cada punto del territorio se le ha asignado un valor de Qb en función del valor de las estaciones vecinas.

Para el cálculo de los valores interpolados entre las estaciones, se ha asignado un radio máximo de 75 km donde buscar estaciones próximas dentro de la zona de aplicación

(aproximadamente la distancia máxima entre dos estaciones de aforo próximas entre si), de forma que no influyen en la determinación del caudal básico las estaciones que se encuentren en la otra vertiente de la cuenca del Ebro, al otro lado de la zona de exclusión (ver Figura 4.2.22). También se ha tenido en cuenta la asignación de un mayor peso a los valores de las estaciones más cercanas. En la Figura 4.2.22 se pueden ver los resultados de esta interpolación, que sirve para una primera aproximación a la determinación de caudales básicos en toda la cuenca sin necesidad de cálculos a partir de registros de series de datos hidrológicos.

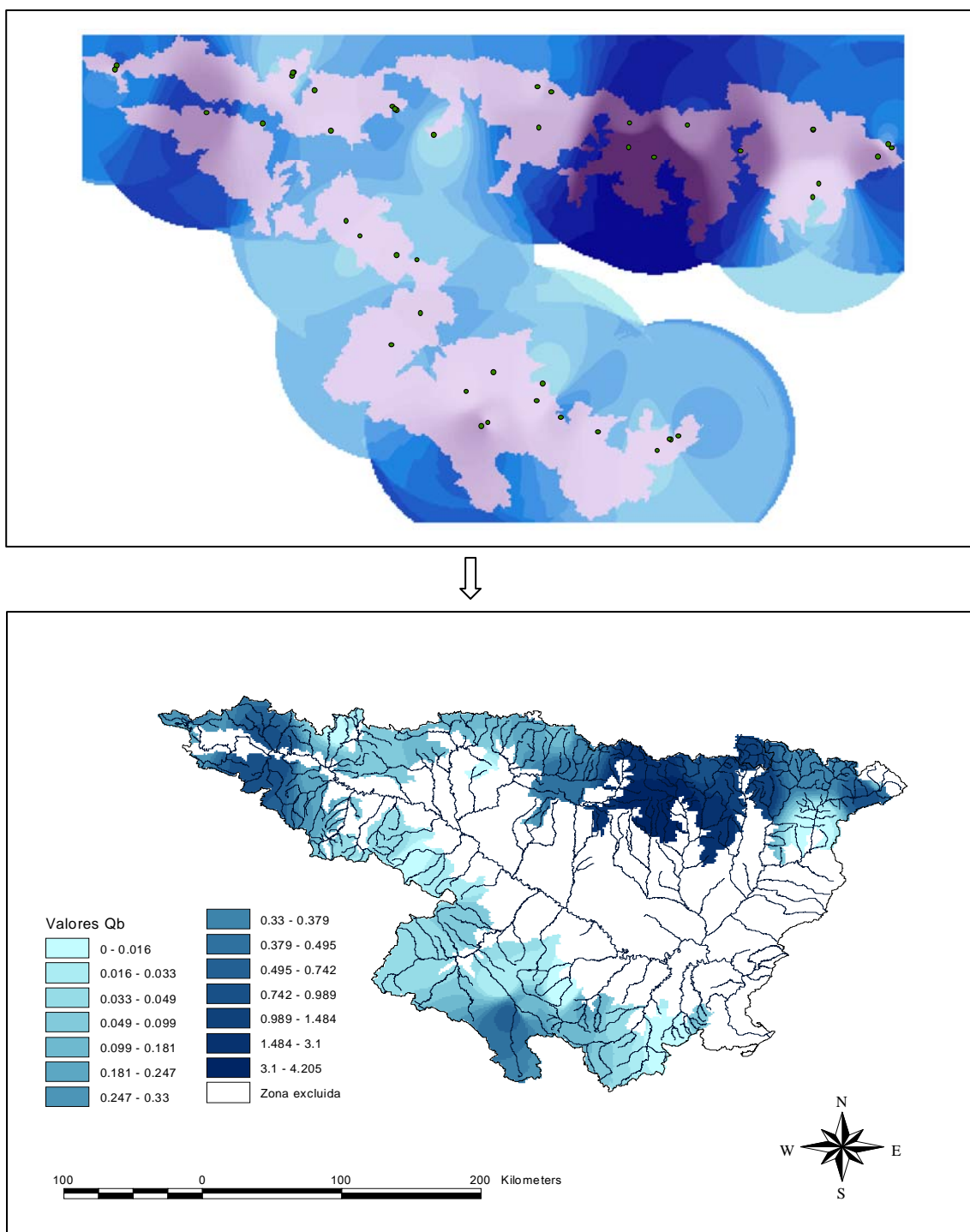


Figura 4.2.22. Interpolación de los valores de Qb en la cuenca del Ebro.

Eliminado: 129¶

### 4.3 APLICACIÓN DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA) A LA DETERMINACIÓN DE Q<sub>b</sub> EN LA CUENCA DEL EBRO

Con formato: Arriba: 70,9 pto, Abajo: 70,9 pto

En este apartado se ha procedido a la construcción de RNA para la predicción de caudales de mantenimiento mínimos, analizando su eficacia y precisión. Asimismo, se han identificado los parámetros o variables que entran a formar parte en estos modelos de predicción y por lo tanto que más influyen en la determinación del caudal de mantenimiento mínimo (Q<sub>b</sub>).

Para ello se han utilizado dos bases de datos, una primera base de datos más extensa que se corresponde con la base datos utilizada en el apartado 4.2, y una segunda base de datos reducida con variables fácilmente disponibles y definidas por la CHE para todas las estaciones de aforo (ver apartado 3.3.2 de metodología).

Con formato: Color de fuente: Automático

Eliminado: XX

#### 4.3.1 CONSTRUCCIÓN DE RNA A PARTIR DE BASE DE DATOS GENERAL

La mejor red obtenida por los procedimientos descritos con objetivo de maximización de la correlación entre los datos de caudales de mantenimiento mínimos reales y las predicciones de la red se presenta en la figura 4.3.1. La red (RED1) tiene una estructura 2-5-1, es decir, tiene dos nodos de entrada, cinco nodos en la capa intermedia o capa oculta, y uno en la capa de salida que corresponde al caudal de mantenimiento mínimo (Q<sub>b</sub>). Las dos variables independientes del modelo son X72, el promedio para todos los años de los mínimos de caudales medios mensuales, y X130, referente al porcentaje de usos del suelo de la cuenca, expresado como el porcentaje de superficie agrícola más la mitad del porcentaje de superficie forestal. La superficie forestal reduce notablemente la producción de agua en una cuenca, que puede llegar a ser de cerca del 50% (por ejemplo, Hobar Perry *et al.*, 2000) sobre todo en épocas de caudales bajos. La variable X72, se incorpora al modelo mediante una transformación de tipo loglog en el nodo de entrada, mientras que X130 experimenta una transformación de tipo lineal.

Eliminado: <sp>

Eliminado: caudales de mantenimiento

Eliminado: 4

Eliminado: 5

Eliminado: i. e

Eliminado: .

Eliminado: 4

Con formato: Fuente: Cursiva

Eliminado: 5

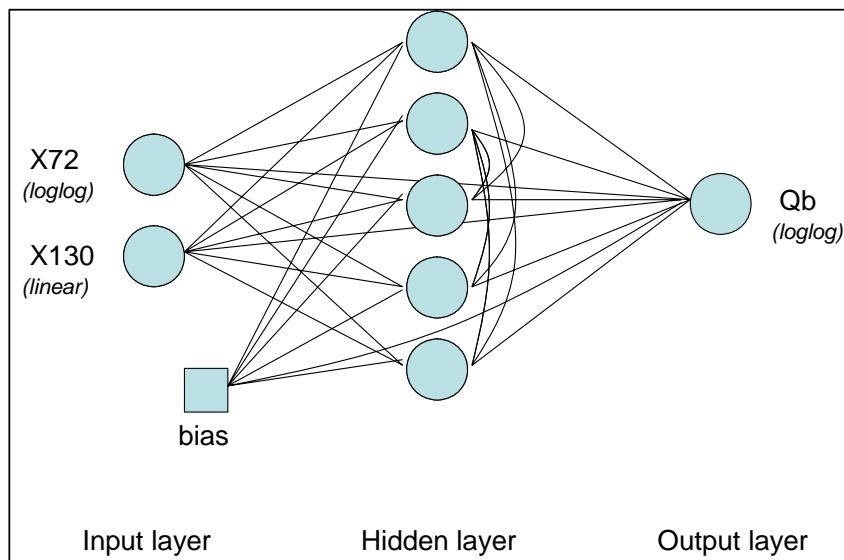


Figura 4.3.1. Arquitectura del modelo RED1.

Con formato: Fuente: Times New Roman, 10 pt

Eliminado: 129¶

El análisis de sensibilidad de esta RNA muestra que la variable  $X_{72}$  es la más influyente a la hora de predecir el  $Q_b$ , hecho que también queda reforzado por la alta frecuencia de selección que presenta (Tabla 4.3.1). Además, el signo de esta variable es positivo, lo que indica una relación directa entre  $X_{72}$  y el  $Q_b$  (al aumentar el promedio para todos los años de los mínimos de caudales medios mensuales aumenta el  $Q_b$ ). La otra variable significativa ( $X_{130}$ ) resulta ser mucho menos influyente (valor de análisis de sensibilidad y frecuencia de selección bajos), estando relacionada de forma inversa con el  $Q_b$  (al aumentar el porcentaje de superficie con cubierta vegetal, especialmente agrícola, disminuye el caudal de mantenimiento mínimo).

Eliminado: ¶

Eliminado: 4

Eliminado: caudal de mantenimiento

Eliminado: 4

Eliminado: caudal de mantenimiento

Eliminado: caudal de mantenimiento

Eliminado: 5

Eliminado: caudal de mantenimiento

Tabla 4.3.1. Frecuencia de selección e influencia de las variables seleccionadas en la RED1 para la predicción del  $Q_b$ .

Average	$X_{72}$	$X_{130}$
$Q_b$	0,70220047	-0,09071121
Variance	$X_{72}$	$X_{130}$
$Q_b$	0,01261196	0,07626433
Frequency	0.875	0.173

Eliminado: 4

Eliminado: 5

Eliminado: 4

Eliminado: 5

En esta red se han obtenido correlaciones muy altas ( $R > 0.97$ ) entre los valores observados y estimados de la variable dependiente, tanto para los datos de entrenamiento, como de test. Es destacable que los valores de correlación obtenidos para los datos de validación, no utilizados en la construcción del modelo, también han resultado muy altos ( $R = 0.98$ ). Por otro lado, el error medio absoluto es relativamente bajo ( $< 0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ , Tabla 4.3.2), por lo que se podría considerar una red con buen comportamiento general respecto a la predicción de  $Q_b$  (Figura 4.3.2). Sin embargo, el error máximo absoluto entre el valor calculado y la predicción de la red para algunas estaciones de aforo es relativamente grande (Figura 4.3.2). En concreto, en las dos estaciones de aforo donde el  $Q_b$  calculado ha resultado mayor se han obtenido errores por defecto en la predicción de caudales de hasta  $1.32 \text{ m}^3/\text{s}$  (Tabla 4.3.2), valores que en algunos casos pueden no ser admisibles desde un punto de vista ecológico para mantener el correcto funcionamiento y estructura del ecosistema fluvial.

Eliminado: caudales de mantenimiento

Eliminado: caudal de mantenimiento

Tabla 4.3.2. Resultados en la predicción del  $Q_b$  en la RED1.

$Q_b$	R	Avg. Abs.	Max. Abs.	RMS	Accuracy (5%)	Conf. Interval (95%)	Records
Train	0,9712140	0,09593623	0,8948746	0,211223	0,96	0,4357106	25
Test	0,9802161	0,16430370	1,3199310	0,3951225	0,9166667	0,8719112	12
Valid	0,9812312	0,05497019	0,1174962	0,067588	1	0,1562163	9

Si analizamos la localización y características hidrológicas de estas dos estaciones de aforo se puede ver que están situadas en el río Ara, río que presenta unas características hidrológicas que lo diferencian del resto de la cuenca del Ebro. Este río, tal y como se apuntó en el apartado 4.2.1.6, está caracterizado por presentar los mayores caudales medios y mínimos de los tramos estudiados de la cuenca del Ebro, con una cierta variabilidad a lo largo del año e incluso interanual. Los caudales circulantes están pocas veces por debajo del 20% del caudal medio anual, y esto ocurre por períodos de tiempo pequeños. Los coeficientes de variación de caudales son pequeños, a pesar de la variabilidad estacional, debido a que el régimen de caudales medios es relativamente alto.

Con formato: Fuente: Times New Roman, 10 pt

Estas estaciones se encuentran localizadas en cuencas permeables con gran capacidad máxima de infiltración (zonas calizas o materiales arenosos) y alto porcentaje de superficie forestal.

Así, esta red constituye un buen modelo de predicción de  $Q_b$  para la mayoría de estaciones de aforo ya que según se puede apreciar en la figura 4.3.2, los resultados estimados se ajustan bien a los valores calculados de  $Q_b$ , y en especial en los rangos de caudales de mantenimiento mínimos bajos, normalmente los mas conflictivos desde el punto de vista de la gestión. El modelo debería reevaluarse para las estaciones de aforo con valores de  $Q_b$  altos, ya que da errores por defecto en torno al 30%. Sin embargo, se trata de estaciones de aforo que representan cursos fluviales con unas características hidrológicas claramente diferentes del resto de la cuenca, por lo que también podría considerarse la conveniencia de estudiarlas de forma independiente, si pudiera generarse una base de datos suficiente.

Eliminado: caudales de mantenimiento

Eliminado: caudales de mantenimiento

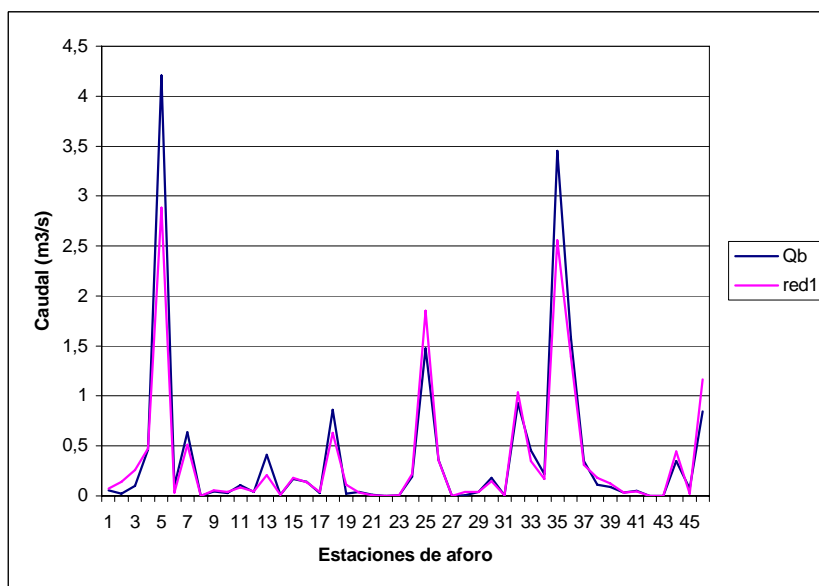


Figura 4.3.2. Valores de  $Q_b$  calculados para las estaciones de aforo y predicciones del mismo con la RED1.

Los resultados obtenidos en la construcción de redes con función objetivo de reducción del error medio cuadrático cometido, resuelve en parte el problema planteado en la red anterior respecto a las estaciones con mayores caudales de mantenimiento.

Así, se ha obtenido una segunda red (RED2), que presenta una estructura 2-4-1 (Figura 4.3.3), es decir, dos nodos en la capa de entrada, cuatro en la capa oculta y uno en la de salida ( $Q_b$ ). Las dos variables que entran en este modelo son  $X_{72}$ , el promedio para todos los años de los mínimos de caudales medios mensuales, que de nuevo lo hace a través de una transformación mediante una función loglog, y  $X_{113}$ , el valor medio de la longitud del periodo en días en que los caudales están continuamente por debajo del 40% del caudal medio anual, que lo hace mediante una transformación cuadrática.

Con formato: Fuente: Times New Roman, 10 pt

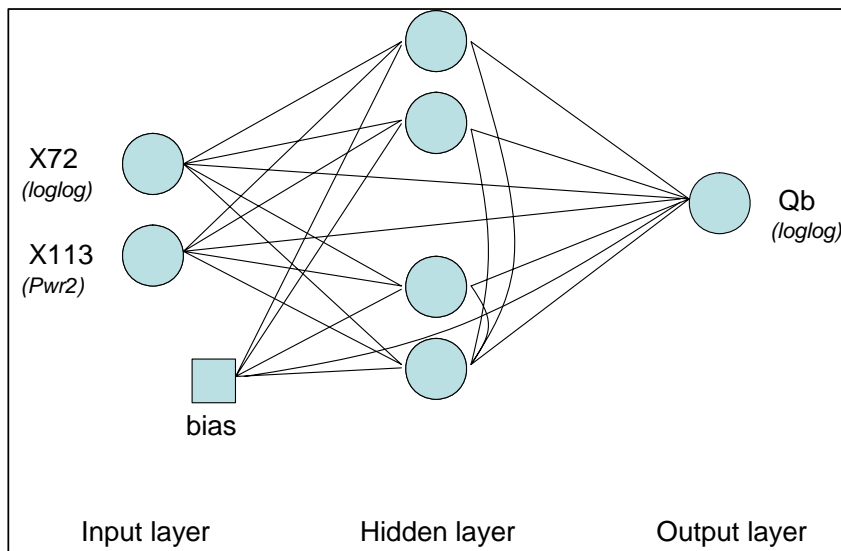


Figura 4.3.3. Arquitectura del modelo RED2.

El análisis de sensibilidad y de frecuencias de selección de las variables (Tabla 4.3.3) muestra que de nuevo la variable  $X_{72}$  es la más influyente a la hora de predecir el  $Q_b$ , existiendo una relación directa entre ambos. La otra variable seleccionada en el modelo ( $X_{113}$ ) ha resultado ser mucho menos influyente (valor de análisis de sensibilidad y frecuencia de selección bajos, en concreto tres veces menos que  $X_{72}$ ), estando también relacionada de forma directa con el  $Q_b$  (signo positivo).

Tabla 4.3.3. Frecuencia de selección e influencia de las variables seleccionadas en la RED2 para la predicción del  $Q_b$ .

	$X_{72}$	$X_{113}$
Average		
$Q_b$	0,67248601	0,21222222
Variance		
$Q_b$	0,04657089	0,29536247
Frequency	0.853	0.294

Los resultados obtenidos en la RED2 (Tabla 4.3.4) son la consecuencia lógica de los cambios introducidos en el aprendizaje de dicha red. Así, los errores medios absolutos son menores de  $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$  tanto para los datos de entrenamiento como para los de test y validación. Como era de esperar, los errores máximos absolutos también se han reducido considerablemente ( $< 0.44 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en todos los conjuntos de datos.

Tabla 4.3.4. Resultados en la predicción del  $Q_b$  en la RED2.

$Q_b$	R	Avg. Abs.	Max. Abs.	RMS	Accuracy (5%)	Conf. Interval (95%)	Records
Train	0,934522	0,06525037	0,4397939	0,1293413	1	0,2668051	25
Test	0,9977414	0,07666381	0,2119564	0,107886	1	0,2380705	12
Valid	0,9093445	0,05897959	0,2647863	0,1047396	1	0,242085	9

Con formato: Sangría de texto normal, Sangría: Izquierda: 0 pto

Eliminado: ¶  
 <sp>Así, se ha obtenido una segunda red (RED2), que presenta una estructura 2-4-1 (Figura 4.3.3), es decir, dos nodos en la capa de entrada, cuatro en la capa oculta y uno en la de salida ( $Q_b$ ). Las dos variables que entran en este modelo son  $X_{24}$ , el promedio para todos los años de los mínimos de caudales medios mensuales, que de nuevo lo hace a través de una transformación mediante una función loglog, y  $X_{40}$ , el valor medio de la longitud del periodo en días en que los caudales están continuamente por debajo del 40% del caudal medio anual, que lo hace mediante una transformación cuadrática.¶

Con formato: Fuente: Times New Roman, 10 pt

Eliminado: 4

Eliminado: caudal de mantenimiento

Eliminado: 40

Eliminado: 4

Eliminado: caudal de mantenimiento

Eliminado: 4

Eliminado: 40

Eliminado: 4

Eliminado: 40

Con formato: Fuente: Times New Roman, 10 pt



Sin embargo, los valores de correlación obtenidos en esta red (RED2) se han reducido respecto a los de la anterior (RED1), sobre todo en las observaciones de validación de resultados, aunque siguen siendo altos ( $R > 0.90$ ). Por lo tanto, esta red sería un buen modelo general de predicción de  $Q_b$  ya que según se puede apreciar en la figura 4.3.4, los valores estimados se ajustan bien a los valores calculados tanto en los rangos de  $Q_b$  bajos como en los altos. A pesar de ello, debe tenerse en cuenta que su capacidad de generalización de resultados sería algo menor que la del modelo anterior.

Eliminado: ¶  
¶

Eliminado: caudales de mantenimiento

Eliminado: caudales de mantenimiento

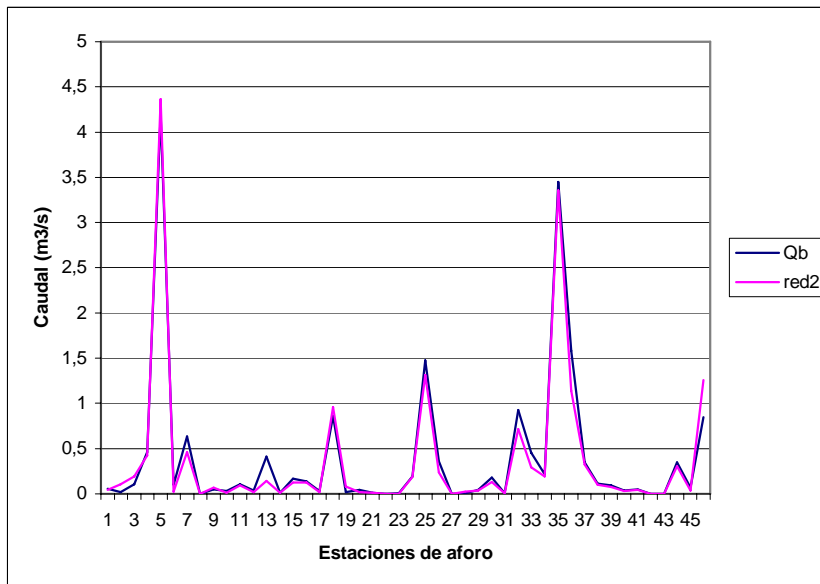


Figura 4.3.4. Valores de  $Q_b$  calculados para las estaciones de aforo y predicciones del mismo con la RED2.

Ambos modelos comparten una misma problemática desde el punto de vista de su potencial aplicación operativa. En concreto, en los dos modelos anteriores se ha encontrado que el caudal de mantenimiento mínimo depende bien del valor medio de la longitud del periodo en días en que los caudales están continuamente por debajo del 40% del caudal medio anual ( $X_{113}$ ) o bien del porcentaje de usos del suelo de la cuenca ( $X_{130}$ ), variables que no se pueden obtener directamente de los datos recogidos habitualmente en las estaciones de aforo.

Eliminado: 40

Eliminado: 5

El mejor modelo obtenido a partir de las bases de datos limitadas a 9 variables independientes de partida, debería permitir superar esta limitación, a igualdad de resultados frente a las redes anteriores.

### 4.3.2 CONSTRUCCIÓN DE RNA A PARTIR DE LA BASE DE DATOS REDUCIDA (9 VARIABLES)

La aplicación de los mismos procedimientos de construcción y criterios de selección descritos a las bases de datos reducidas (en variables independientes) ha producido como resultado el modelo RED3 (Figura 4.3.5). Esta red maximiza la correlación de los datos de

Con formato: Fuente: Times New Roman, 10 pt

caudal estimado y observado y presenta una estructura 3-6-1, es decir, tres nodos en la capa de entrada, seis en la capa oculta y uno en la de salida. A pesar de tener tres nodos de entrada, únicamente dos variables participan del modelo: el promedio del caudal medio diario para todos los años (Qmedio) y el caudal igualado o superado 270 días al año (aproximadamente el 75% del tiempo) (Q270). La primera variable (Qmedio) entra en el modelo a través de una transformación de tipo inversa, mientras que la segunda (Q270) entra dos veces, una mediante una transformación de tipo lineal y otra mediante una transformación *loglog*.

Con formato: Fuente: Cursiva

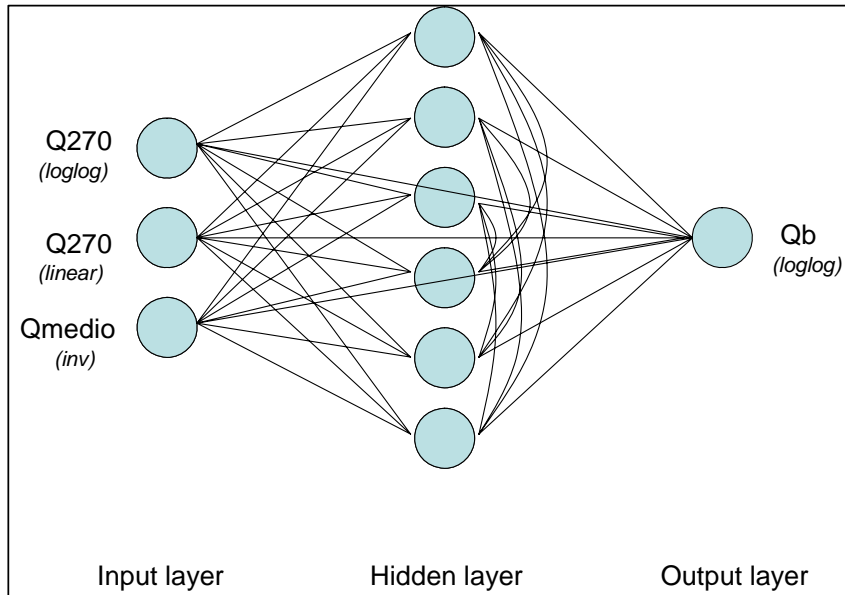


Figura 4.3.5. Arquitectura del modelo RED3.

El análisis de sensibilidad y de frecuencias de selección de las variables (Tabla 4.3.5) muestra que la variable Q270 es la más influyente a la hora de predecir el caudal de mantenimiento mínimo, existiendo una relación directa entre ambos (signo positivo). La otra variable incluida en el modelo (Qmedio) ha resultado ser mucho menos influyente (valor de análisis de sensibilidad y frecuencia de selección bajos), estando también relacionada de forma directa con el Qb.

Eliminado: caudal de mantenimiento

Tabla 4.3.5. Frecuencia de selección e influencia de las variables seleccionadas en RED3 para la predicción del Qb.

Average	Q medio	Q270
Qb	0,02077995	0,62218785
Variance	Q medio	Q270
Qb	0,17262131	0,39765614
Frequency	0.567	0.750

Eliminado: ¶

Al igual que ocurría con el modelo RED1, en el modelo RED3 se han obtenido valores de correlación muy altos ( $R > 0.97$ ) para los tres conjuntos de datos, entrenamiento, test y

Con formato: Fuente: Times New Roman, 10 pt

Eliminado: 129¶

validación (Tabla 4.3.6). Los resultados son similares a los obtenidos en el modelo RED1. Igualmente, la tendencia en los errores en la predicción del  $Q_b$  ha sido también similar. El error medio absoluto es relativamente bajo ( $< 0.20 \text{ m}^3/\text{s}$ , Tabla 4.3.6), por lo que se podría considerar una red con un buen comportamiento en cuanto a la predicción de caudales de mantenimiento (Figura 4.3.6). Sin embargo, en los valores de los errores máximos absolutos (Figura 4.3.6), se puede apreciar que existen algunas estaciones de aforo donde las diferencias entre los valores de  $Q_b$  calculados y las predicciones de la red son grandes. En concreto, en las dos estaciones de aforo donde el  $Q_b$  calculado ha resultado mayor se pueden llegar a obtener errores por exceso en la predicción de caudales de hasta  $1.84 \text{ m}^3/\text{s}$  (Tabla 4.3.6), valores aparentemente buenos para el río pero que pueden no ser admisibles desde el punto de vista de otros posibles aprovechamientos hidráulicos objeto de la regulación. De nuevo, los mayores errores se han obtenido en estaciones de aforo situadas en el río Ara, río que como ya se apuntó anteriormente, presenta unas características hidrológicas que lo diferencian del resto de la cuenca del Ebro.

Eliminado: caudal de mantenimiento

Eliminado: caudal de mantenimiento

Eliminado: un

Eliminado: ecológico

Tabla 4.3.6. Resultados en la predicción del  $Q_b$  en RED3.

Qb	R	Avg. Abs.	Max. Abs.	RMS	Accuracy (10%)	Conf. Interval (95%)	Records
Train	0,9722166	0,2004347	1,847175	0,4590408	1	0,9469092	25
Test	0,9863682	0,112372	0,6349664	0,2072879	1	0,4574193	12
Valid	0,9775639	0,1561475	0,6150557	0,2460457	1	0,5686862	9

Para intentar reducir estas diferencias absolutas se ha seguido la misma estrategia que con el modelo RED2, es decir, modificar el aprendizaje del modelo de red para minimizar el error medio cuadrático, pero en este caso no se han conseguido mejoras del modelo considerado. Por lo tanto, al igual que ocurría con RED1, el modelo RED3 sería un buen modelo de predicción de caudales de mantenimiento para la mayoría de estaciones de aforo ya que según se puede apreciar en la figura 4.3.6, los resultados se ajustan bien a los valores calculados, al menos en los rangos de caudales de mantenimiento bajos y medios. En las estaciones de aforo con valores de  $Q_b$  altos y características hidrológicas diferenciadas este modelo debería reconsiderarse, ya que puede dar errores por exceso en torno al 45%. Podría considerarse la conveniencia de estudiar estos ríos de forma independiente, si pudiera obtenerse una base de datos suficiente para la modelización.

Eliminado: caudales de mantenimiento

Eliminado: ¶

Con formato: Fuente: Times New Roman, 10 pt

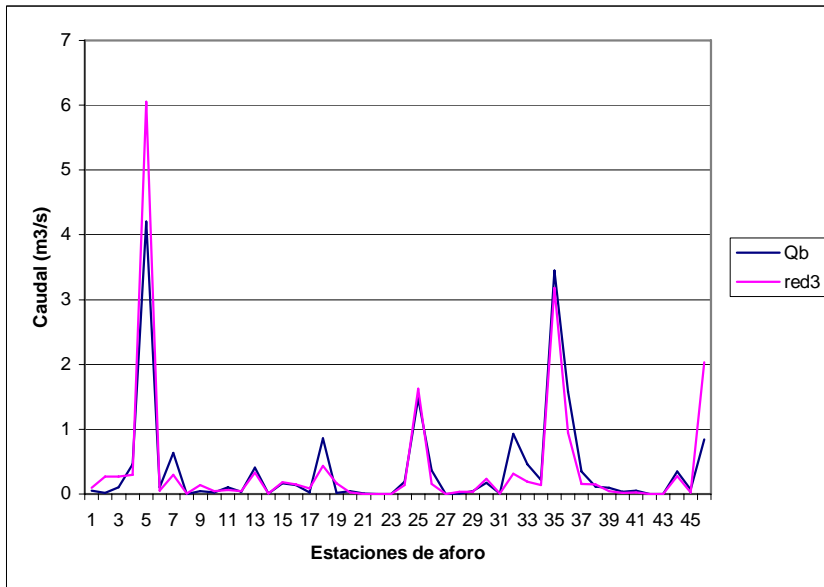


Figura 4.3.6. Valores de  $Q_b$  calculados para las estaciones de aforo y predicciones del mismo con la red3.

Con formato: Sangría de texto normal, Sangría: Izquierda: 35,45 pto, Derecha: 35,35 pto

Eliminado: ¶

¶  
¶  
¶  
¶  
¶

Con formato: Fuente: Times New Roman, 10 pt

## **Capítulo 5. Conclusiones**

Para finalizar este trabajo de investigación, a continuación se presentan las conclusiones referentes a los tres apartados analizados en el capítulo 4 de resultados y discusión.

### **1. Conclusiones relativas al análisis del método de cálculo del $Q_b$**

Del análisis de los resultados obtenidos se deduce que el Método del Caudal Básico:

- Proporciona un régimen de caudales de mantenimiento que se adapta a la distribución temporal característica del régimen natural de los ríos, obteniéndose unos resultados similares (aunque más atenuados de acuerdo a las características hidrológicas e hidráulicas del nuevo curso fluvial) a los obtenidos por técnicas estadísticas más complejas (análisis de series temporales).
- Es sensible al tipo de hidrograma de cada río y por lo tanto está adaptado a sus características particulares, por lo que el  $Q_b$  es específico para cada río e incluso para cada tramo de río.
- Requiere datos que se pueden obtener fácilmente a partir de estaciones de aforo, es muy efectivo en cuanto a tiempo y costes de aplicación (se pueden obtener resultados de forma muy rápida), con lo que el tiempo que otras metodologías utilizan en establecer los caudales mínimos se podría utilizar en validar y contrastar los resultados (cosa que también habría que hacer en cualquier situación). Además, utiliza series de datos relativamente largas (normalmente de al menos 10 años) donde se refleja la variabilidad interanual existente, la cual puede ser un factor determinante de la estructura y funcionamiento del ecosistema fluvial. La longitud de estas series condiciona la validez temporal de los resultados, la cual no debe exceder en principio al número de años utilizado como periodo para el cálculo de  $Q_b$ , aunque puede variar en función de la representatividad de la serie de datos hidrológicos utilizada para el cálculo respecto al régimen hidrológico general.
- Proporciona unos valores de caudales mínimos obtenidos objetivos, no arbitrarios y fácilmente reproducibles, con lo que se pueden comparar fácilmente diferentes situaciones, tramos de ríos o ríos.

Además, este método se ha aplicado a un número elevado de ríos o tramos de río (en concreto 43 puntos) y se ha comprobado que da buenos resultados (o al menos los resultados son coherentes) desde el punto de vista hidrológico e hidráulico. En particular, se ha comprobado que:

- Los resultados obtenidos de la aplicación a una serie de ríos son coherentes con las características hidrológicas de los mismos y con los resultados que se pudieran obtener por otros métodos hidrológicos. En particular, los caudales mínimos calculados ( $Q_b$ ) suponen en su mayoría (casi el 70% de los casos) entre el 5% y el 30% del módulo interanual, siendo la media del 17%. Estos valores de  $Q_b$  normalmente se encuentran o superan el intervalo de caudales más frecuentes, y se corresponden con valores situados entre los caudales clasificados  $Q_{330}$  y  $Q_{347}$  (caudal igualado o superado en el 90% y 95% del tiempo respectivamente).

- Los resultados garantizan los criterios mínimos fijados en la bibliografía como requerimientos hidráulicos para crear hábitat físico, aún en las secciones más limitantes. En concreto, las profundidades máximas obtenidas por la simulación del Qb en general superan los 20-25 cm recomendados como umbral para proporcionar un hábitat físico adecuado, mientras que las velocidades medias del agua creadas en esas situaciones oscilan entre 0,48 m/s y 0,32 m/s, por lo que no deben existir limitaciones de habitabilidad.
- Para los ríos estudiados el establecimiento de un régimen de caudales de mantenimiento no supone grandes pérdidas de hábitat potencial útil ni respecto a caudales medios (como media inferior al 6,4% de pérdida de APU, nunca superior al 20,1%) ni respecto a caudales mínimos (como media inferior al 4,5% de pérdida de APU, nunca superior al 12,5%). Por el contrario, y especialmente para los estadios de desarrollo de alevín y frezadero, en muchos casos supone un aumento de hábitat potencial útil.

Sin embargo, esta metodología también tiene una serie de limitaciones al igual que las demás vistas en los capítulos anteriores, de las cuales las más importantes son:

- La necesidad de una serie de caudales medios diarios en el tramo a estudiar, datos que normalmente si no se dispone de una estación de aforos cerca no estarían disponibles, ya que los modelos de predicción de caudales en ríos actuales normalmente no tienen la precisión requerida (se utilizan para obtener aportaciones mensuales o incluso semanales, pero no sirven para obtener caudales medios diarios). Este problema es común a muchos de los métodos hidrológicos y puede ser relativamente frecuente a pesar de la extensión de la red de estaciones de aforos por todo el territorio nacional. Una posible solución para este problema sería la extrapolación de datos en función de la extensión de la cuenca y de las características de la misma (cubierta vegetal, principalmente, al afectar al coeficiente de escorrentía) si es que existe una estación de aforos en el mismo río relativamente cerca o en una cuenca próxima de características similares.
- El método es muy sensible a la calidad de los datos. Se han encontrado series de datos de caudales medios diarios para la misma estación de aforos y el mismo periodo de tiempo de distintas fuentes que aun siendo en valores medios globales similares, diferían notablemente en los valores diarios y dieron resultados significativamente distintos. Esta es una limitación que tenemos que asumir, ya que los datos hidrológicos son los que están, y sobre ellos se realizan todas las predicciones y ordenación de los recursos hídricos. No obstante, las series siempre se pueden depurar para eliminar cualquier anomalía que se detecte en el funcionamiento de la estación de aforos y recogida de datos que pudieran influir en los resultados finales.

## **2. Conclusiones relativas a la aplicación del Método del Caudal Básico en la Cuenca Hidrográfica del Ebro**

La metodología utilizada para la regionalización a partir del análisis de componentes principales y análisis de clusters ha dado buenos resultados, tanto para el análisis por separado de los grupos de variables como para la regionalización global.

La regionalización de la cuenca del Ebro resultante a partir de los parámetros hidrológicos y físicos estudiados delimita claramente cuatro zonas homogéneas:

**Zona 1:** Incluye cuencas de alta montaña, de régimen nival y orografía abrupta, situadas en cabecera del Pirineo. Corresponde a zonas con escasa vegetación, capacidad máxima de humedad del suelo pequeña y elevados coeficientes de escorrentía.

**Zona 2:** Incluye las zonas de cabecera del oeste y sur de la cuenca del Ebro, así como zonas montañosas localizadas por debajo de la zona 1. Agrupa cuencas relativamente grandes de montaña húmeda con caudales más o menos elevados y baja variabilidad temporal, así como cuencas de montaña mediterránea con marcada variabilidad anual de caudales, y con predominio de caudales bajos. Son zonas con altos porcentajes de superficie forestal arbórea y por tanto alta capacidad máxima de humedad del suelo y de infiltración.

**Zona 3:** Incluye regiones situadas normalmente por debajo de las del grupo 2, con altos porcentajes de superficie forestal y por lo tanto altas capacidades de infiltración y de humedad del suelo. Agrupa cuencas de montaña con una clara tendencia mediterránea, gran variabilidad anual de caudales donde aparecen unas pocas crecidas de gran magnitud junto a caudales circulantes que se sitúan en muchas ocasiones por debajo del 20% del caudal medio anual y por periodos de tiempo dilatados.

**Zona 4:** Incluye únicamente a dos estaciones situadas en el río Ara, afluente del río Cinca. Este río se diferencia del resto por presentar los mayores caudales medios y mínimos, con una cierta variabilidad a lo largo del año e incluso entre años, aunque los coeficientes de variación de caudales son pequeños (debido al régimen de caudales medios relativamente alto).

En estas zonas homogéneas se ha podido establecer una relación sencilla (ecuación lineal) para determinar el  $Q_b$  a partir de un número bajo de variables con un coeficiente de determinación alto. Así, en las distintas zonas el  $Q_b$  se puede calcular a partir de las siguientes variables (la zona 4 no se incluyó en el análisis al contar únicamente con dos estaciones de control):

*Zona 1:* Caudal igualado o superado durante 347 días al año ( $Q_{347}$ )

*Zona 2:* Índice de compacidad de Gravelius y caudal igualado o superado durante 347 días al año ( $Q_{347}$ )

*Zona 3:* Promedio para todos los años de los mínimos de caudales medios mensuales

La extrapolación de los valores de  $Q_b$  calculados en las estaciones de aforo al resto de la zona de aplicación de la cuenca del Ebro (excluyendo tramos bajos de los ríos y zonas alteradas) mediante el método de la ponderación por el inverso de la distancia ha permitido, como una primera aproximación, la determinación de caudales básicos en toda la cuenca sin necesidad de cálculos a partir de registros de series de datos



hidrológicos. Esta aplicación práctica de determinación de  $Q_b$  en la cuenca del Ebro facilita la toma de decisiones en la ordenación de recursos hídricos a gran escala.

### **3. Conclusiones relativas a la aplicación de redes neuronales artificiales (RNA) a la determinación de $Q_b$ en la Cuenca Hidrográfica del Ebro**

Los resultados de este estudio confirman la utilidad de explorar el potencial de las RNA para la determinación de caudales de mantenimiento. No obstante, en el desarrollo de estos modelos es crucial tanto el análisis de las bases de datos de partida como una formulación precisa de los objetivos a alcanzar, ya que optar por diferentes estrategias de construcción de los modelos puede condicionar su aplicación operativa.

Así, bajo las condiciones particulares de esta modelización en la cuenca del Ebro, y después de considerar el mayor número de variables posible, los caudales de mantenimiento calculados a partir del método del caudal básico resultan dependientes en primer lugar y de forma directa del promedio para todos los años de los mínimos de caudales medios mensuales. Otras variables que han resultado influyentes en el caudal de mantenimiento son el valor medio de la longitud del periodo en días en que los caudales están continuamente por debajo del 40% del caudal medio anual (directamente proporcional) y en menor medida también influye el porcentaje de usos del suelo de la cuenca, de tal forma que cuando disminuye el porcentaje de superficie con cubierta vegetal, o aumenta el porcentaje de superficie forestal sobre el de superficie agrícola, el caudal de mantenimiento es mayor. Con un escaso número de variables, es posible predecir el caudal de mantenimiento  $Q_b$  que se obtendría en una estación de aforo con un coeficiente de determinación muy elevado ( $> 0.97$ ), aunque alguna de las variables puede ser difícil de generar.

La construcción de modelos de red utilizando variables hidrológicas disponibles para todas las estaciones de la cuenca del Ebro, sugiere que los caudales de mantenimiento dependen en primer lugar y de forma directa del  $Q_{270}$ , y en menor medida y también de forma directa del caudal medio ( $Q_m$ ). Por tanto, también es posible predecir el caudal de mantenimiento  $Q_b$  que se obtendría en una estación de aforo con un coeficiente de determinación igualmente elevado, a partir de un escaso número de variables generalmente disponibles y públicas.

Sin embargo, la elección de un modelo más accesible desde el punto de vista de la obtención de los datos (RED3 sobre RED1), implica aumentar el error máximo absoluto en determinadas estaciones. Los modelos obtenidos con el fin de reducir el error máximo absoluto ponen en evidencia las consecuencias de elegir diferentes funciones-objetivo en el proceso de aprendizaje de las RNA. Modificar la función de evaluación utilizada (sustituir como medida de la bondad de un modelo la máxima correlación lineal por el mínimo error RMS), implica optar o bien por modelos precisos para la mayoría de estaciones de aforo con errores considerables en un número reducido de las mismas u optar por modelos menos precisos en general, pero que no yerran en gran medida en ninguna estación. La alternativa puede considerarse similar a la de la elección entre un error de tipo I o II en los métodos estadísticos.

En cualquier caso, la generalización de los resultados obtenidos en este estudio presenta otras limitaciones relacionadas con la base de datos de partida. Al ser reducido el número de estaciones de aforo seleccionadas, debido a la carencia de datos suficientes

para el cálculo del  $Q_b$ , la amplitud del rango de datos de caudales de mantenimiento no es excesiva. Las RNA funcionan bien con datos incluidos dentro del rango de datos de partida. Para datos fuera de ese rango los modelos no son capaces de hacer predicciones, dando por defecto el mayor o menor valor calculado con los datos de partida (según sean datos por encima o por debajo del rango de datos respectivamente). En cualquier caso, esta limitación es generalizable a cualquier modelo obtenido por métodos más o menos convencionales, estadísticos, por ejemplo. La extrapolación de valores fuera del intervalo de cálculo es siempre cuestionable y debería evitarse. Por ejemplo, en los tramos de río medios y bajos, donde los caudales circulantes son en general mayores, los caudales de mantenimiento también deberían serlo. Pero en muchos de estos casos, al menos en la cuenca del Ebro, se trata de tramos donde existe una alteración de las características naturales bien del régimen hidrológico, o bien de la geometría del cauce. Esto hace que muchas de las metodologías tradicionales para determinar el caudal de mantenimiento mínimo, como la del Caudal Básico, no se puedan aplicar adecuadamente y se tenga que hacer un estudio específico para determinar dicho caudal, por lo que tampoco sería adecuado establecer un valor procedente de la extrapolación de un modelo.

Podemos concluir, por tanto, que las RNA tienen un gran potencial de aplicación en la predicción de caudales de mantenimiento mínimos en ríos.

### **Futuras líneas de investigación**

#### *Relacionadas con el Método del Caudal Básico*

A pesar de que ya se han realizado trabajos para la validación biológica del Método del Caudal Básico (Cachón, 2003), es necesario continuar con los mismos para contrastar los resultados de la aplicación de un Régimen de Caudales de Mantenimiento en ríos regulados con regímenes hidrológicos muy diversos, y comprobar así la universalidad del método. Además, este tipo de estudios se tendrían que prolongar en el tiempo para ver los resultados a medio y largo plazo.

Otro aspecto importante relacionado con la aplicación del método es la necesidad de bases de datos completas de caudales medios diarios. Por ello, sería muy interesante comprobar la eficacia de modelos de simulación de caudales para la predicción de caudales medios diarios (por ejemplo el modelo Sacramento, utilizado por la Agencia Catalana del Agua) en cuanto a la precisión de los caudales de mantenimiento obtenidos a partir de los mismos respecto a los obtenidos a partir de las series de caudales naturales.

#### *Relacionadas con la regionalización de la Cuenca del Ebro y la predicción de caudales de mantenimiento*

Sería conveniente en estudios futuros ampliar la base de datos (en concreto el número de puntos de aforo donde calcular el  $Q_b$  a partir de series naturales de caudales medios diarios, como se apunta en el apartado anterior) para mejorar la precisión de la identificación de regiones homogéneas así como en la predicción del caudal de

mantenimiento tanto por métodos estadísticos como a través de las RNA. En este último caso, esto permitiría, a raíz del gran potencial mostrado por las RNA en la predicción de caudales de mantenimiento mínimos en ríos, evaluar la necesidad de considerar distintos modelos para las regiones homogéneas con características hidrológicas diferenciadas. De este modo, la estimación de los caudales de mantenimiento mejoraría (los coeficientes de correlación entre los  $Q_b$  estimados y observados aumentarían mientras que los errores cometidos en la predicción disminuirían) ayudando a su vez a una mejor gestión en la ordenación de recursos hídricos a nivel de cuenca.

# **Capítulo 1. Introducción**

1.1 El problema de los caudales ecológicos

1.2 Antecedentes de metodologías de cálculo de caudales ecológicos

1.2.1 Métodos hidráulicos

1.2.2 Métodos hidrológicos

1.2.3 Métodos hidrobiológicos

1.2.4 Métodos holísticos

1.2.5 Otros métodos

1.3 Antecedentes de regionalización hidrológica de cuencas

1.4 Objetivos

## **1.1 EL PROBLEMA DE LOS CAUDALES ECOLÓGICOS**

Durante las últimas décadas, la determinación de caudales ecológicos en ríos regulados, junto con la eutrofización, la deforestación de cuencas y los procesos de erosión, se ha considerado uno de los principales problemas a tener en cuenta en la ordenación y gestión de recursos hídricos en los países desarrollados del ámbito mediterráneo (Prat, 1995). En España, este hecho quedó constatado tanto en el Libro Blanco del Agua en España (Ministerio de Medio Ambiente, 1998) como en el Plan Hidrológico Nacional aprobado por la ley 10/2001, de 5 de julio (posteriormente derogado en 2004 por el Real Decreto Ley de modificación de la Ley 10/2001), donde se dedicaban varios apartados al problema de los caudales ecológicos. Más recientemente, la Directiva Marco del Agua contempla la necesidad de establecer un régimen de caudales adecuado para conseguir los objetivos de protección y gestión de las aguas, y el Real Decreto legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la ley de aguas, define los caudales ecológicos o demandas ambientales como una restricción que se impone con carácter general a los sistemas de explotación.

Los caudales ecológicos o de mantenimiento surgen ante la necesidad de conservar los ecosistemas fluviales, sujetos en el último siglo a una intensa regulación de los recursos hídricos para uso tanto consuntivo como no consuntivo (por ejemplo producción hidroeléctrica). En España tenemos más de 1200 grandes presas, con una regulación de los recursos hídricos en torno al 62% de los recursos naturales que ha producido un marcado deterioro de nuestros ecosistemas acuáticos alterando su morfología y disminuyendo su diversidad biológica, entre otros efectos (Cachón, 2003). Esta sobreexplotación del agua responde a un sentimiento histórico de aprovechamiento de este recurso ligado al desarrollo, probablemente condicionado por su variabilidad espacial y temporal en nuestro ámbito mediterráneo.

A pesar de que la denominación de caudal “ecológico” o “ambiental” es la más extendida en todos los ámbitos a nivel internacional, en la literatura podemos encontrar distintos nombres para la misma definición, entre los que se pueden citar los caudales reservados, mínimos, recomendados o de mantenimiento (denominación que parece tener más aceptación en los últimos años por acercarse más al significado del concepto que define) (Palau, 1994). Independientemente del nombre que le demos, todo el mundo parece estar de acuerdo en cuanto al concepto y función del mismo, ya que “los caudales ecológicos se diseñan para mantener un nivel de funcionalidad biológica suficiente que asegure la continuidad de los procesos y las comunidades naturales existentes tanto en la ribera como en el medio acuático” (Almagro *et al.*, 2003).

Aunque *a priori* parecería sencillo el establecer unos caudales ecológicos o de mantenimiento a la vista de la anterior definición, en la práctica ha resultado y resulta enormemente difícil consensuar cual es el “nivel admisible de desarrollo” de la vida acuática que se pretende mantener (Palau, 1994). Fruto de ello ha sido la proliferación de metodologías de cálculo de caudales de mantenimiento, que si bien en muchos casos no difieren en gran medida en cuanto a los valores calculados, sí lo hacen en cuanto a los fundamentos científicos y justificación de los mismos, objetivos de la gestión, etc. Esto ha llevado a una falta de consenso en cuanto a una metodología universalmente aceptada, y a una anarquía respecto a los métodos utilizados por los distintos organismos gestores de recursos hídricos, tanto a nivel nacional como internacional.

Otro problema asociado a la determinación de caudales de mantenimiento es la necesidad, en la mayoría de los casos, de una base de datos que no siempre está disponible y/o es de laboriosa obtención. Independientemente de la naturaleza del método empleado para la determinación de los caudales de mantenimiento, éste necesitará de unos datos hidrológicos, hidráulicos y/o biológicos que o bien no se dispone de ellos (por ejemplo en los casos de ríos sin estaciones de aforo para datos hidrológicos) o bien requieren de un trabajo de campo para conseguirlos (por ejemplo para la obtención de relaciones entre parámetros hidráulicos y caudales circulantes) que a veces puede ser muy exigente en tiempo y costes asociados (por ejemplo en la obtención de datos de preferencias de hábitat de especies para sus diferentes estadios de desarrollo en los métodos hidrobiológicos). Esto ha provocado que en ciertos casos los organismos gestores de recursos hídricos hayan optado por la aplicación de metodologías prácticas, rápidas y de bajo coste para la ordenación y gestión de estos recursos, aunque pecan por ser excesivamente simplistas y en ocasiones arbitrarias y muy cuestionables.

Una solución a este último problema pasa por la generalización o extrapolación de resultados de unos valores (en nuestro caso de caudales de mantenimiento), conocidos en unos puntos determinados, al resto de los ríos y tramos de río en la cuenca (Andrade, 1999; Bérubé *et al.*, 2002). Para ello, primero sería necesario analizar la inherente complejidad y variabilidad de los sistemas fluviales a través de una regionalización de los mismos donde se identifiquen zonas con diferentes condiciones hidrológicas y tipologías de ríos con comportamientos similares (Baeza, 2002).

## **1.2 ANTECEDENTES DE METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS**

En las últimas décadas se han venido produciendo numerosos intentos para determinar el caudal mínimo necesario en los ríos, y como fruto de ello han surgido gran cantidad de metodologías para su determinación. Estas metodologías se pueden agrupar en tres grandes grupos en función de la naturaleza de datos que requieren (Palau, 1994; Jowett, 1997): los métodos hidráulicos, basados en las características hidráulicas del río (por ejemplo el propuesto por Collings, 1972); métodos hidrológicos, basados en los registros históricos de caudales (por ejemplo el propuesto por Tennant, 1976); y métodos hidrobiológicos, basados en la simulación de hábitats a partir normalmente de las características hidráulicas y las respuestas de determinadas especies (por ejemplo el propuesto por Bovee, 1982). Estos últimos métodos han gozado de una gran aceptación y reconocimiento y han sido muy utilizados en los últimos tiempos, aunque tampoco se han librado de sufrir severas críticas (por ejemplo Orth y Maughan, 1982; Mathur *et al.*, 1984; Gan y Macmahon, 1990; Bovee, 1996; Bird, 1996; Bourgeois *et al.*, 1996; Pollard, 2002).

Más recientemente se ha visto la necesidad de tener una visión más global del ecosistema acuático y se ha desarrollado un cuarto grupo de metodologías llamadas holísticas (Tharme, 1996, citado por Tharme, 2002) donde se tienen en cuenta además de variables hidrológicas, hidráulicas e hidrobiológicas, otro tipo de variables como pueden ser culturales, estéticas o socioeconómicas que representan los distintos intereses y valores ambientales de estos ecosistemas.

Por último, existen otras metodologías que se pueden considerar como combinaciones de los métodos anteriores al tener en cuenta distintos tipos de variables, tanto hidrológicas como hidráulicas e hidrobiológicas.

Desde los primeros métodos propuestos hasta los más actuales se ha notado una clara evolución en su desarrollo que se ha manifestado principalmente en tres aspectos:

1. En primer lugar, en cuanto al resultado del método, es decir, la naturaleza de la propuesta de caudal mínimo. Los primeros métodos proporcionaban un único valor como caudal mínimo para todo el año. Posteriormente se ha visto que es necesario dotar a ese caudal mínimo de una cierta variabilidad estacional puesto que los requisitos de caudal por parte del ecosistema fluvial son distintos a lo largo del año, estableciéndose no un único caudal mínimo sino un régimen de caudales mínimos que incorpore esta variabilidad, es decir, un régimen ambiental de caudales (Palau, 1994; Richter *et al.*, 1996; Richter *et al.*, 1997; Puckridge *et al.*, 1998; Stewardson y Gippel, 2002; Acreman y Dunbar, 2004).
2. En segundo lugar, en cuanto al objetivo a conseguir con la propuesta de caudales mínimos. Los métodos tradicionales se basaban en la determinación de un caudal mínimo que cumpliera los requerimientos de una o varias especies seleccionadas. La selección de especie a proteger se realizaba en base a las especies más representativas del tramo, con un mayor valor económico (por ejemplo especies que se capturen en pesca deportiva) o ecológico (especies protegidas), o especies que sean más exigentes que otras y que su conservación implique la conservación de la práctica totalidad del ecosistema. Pero el conocimiento del medio y la demanda de la sociedad han evolucionado de forma que hoy en día se piensa en un aprovechamiento integral de los recursos naturales dentro de un desarrollo sostenible que garantice las distintas demandas o usos de los ecosistemas fluviales así como la conservación de todos sus elementos. En este sentido se han desarrollado en los últimos años unas metodologías para la determinación de caudales mínimos que se han llamado de tipo holístico, que más que métodos de cálculo de caudales mínimos constituyen aproximaciones multidisciplinares a la obtención de los mismos. Entre estas metodologías se pueden destacar las desarrolladas en Sudáfrica (Building Block Methodology -BBM-, King y Louw, 1998; King *et al.*, 2000) y en Australia (Holistic Approach, Arthington, 1998, citado por King *et al.*, 1999), en las cuales la recomendación de caudales se realiza en base a todos los componentes o atributos del ecosistema fluvial obtenidos a través de la opinión de un grupo de expertos que trabaja en sesiones de puesta en común.
3. En tercer lugar, en cuanto al número de parámetros que utilizan. Muy ligado con el punto anterior, en un principio se tenían en cuenta únicamente uno o un número muy bajo de parámetros para el cálculo del caudal mínimo, mientras que los métodos más actuales tienen en consideración muchos más parámetros.

A continuación se van a describir brevemente algunos de los principales métodos hidráulicos, hidrológicos y de simulación de hábitat, así como el método de BBM (King y Louw, 1998; King *et al.*, 2000) por ser el que actualmente se encuentra más desarrollado y mejor documentado de los métodos llamados holísticos.

## 1.2.1 MÉTODOS HIDRÁULICOS

### 1.2.1.1 Método del perímetro mojado (Collings, 1972; Nelson, 1984)

En este método, originariamente desarrollado y comprobado para su uso en ríos de Montana, se asume que el perímetro mojado representa adecuadamente condiciones limitantes de hábitat. Parte de la hipótesis de que existe una relación directa y creciente entre el perímetro mojado de las secciones de un curso de agua y los hábitats para peces. La idea es que a medida que aumenta el caudal, aumenta la sección inundada del lecho y por lo tanto la cantidad de hábitat para peces.

El establecimiento de la curva de variación del perímetro mojado en función del caudal permite generalmente identificar lo que Nelson llamó un “punto de inflexión”<sup>1</sup> a partir del cual pequeñas disminuciones del caudal se traducen en fuertes variaciones del perímetro mojado (Figura 1). Este punto de inflexión en la curva, obtenida a partir del perímetro mojado medio del tramo derivado del estudio de al menos 3 a 10 secciones transversales críticas (aunque en algunos casos se han estudiado más de 20 secciones, como en Bietz *et al.*, 1985), sirve de criterio para determinar el caudal mínimo (Randolph y White, 1984).

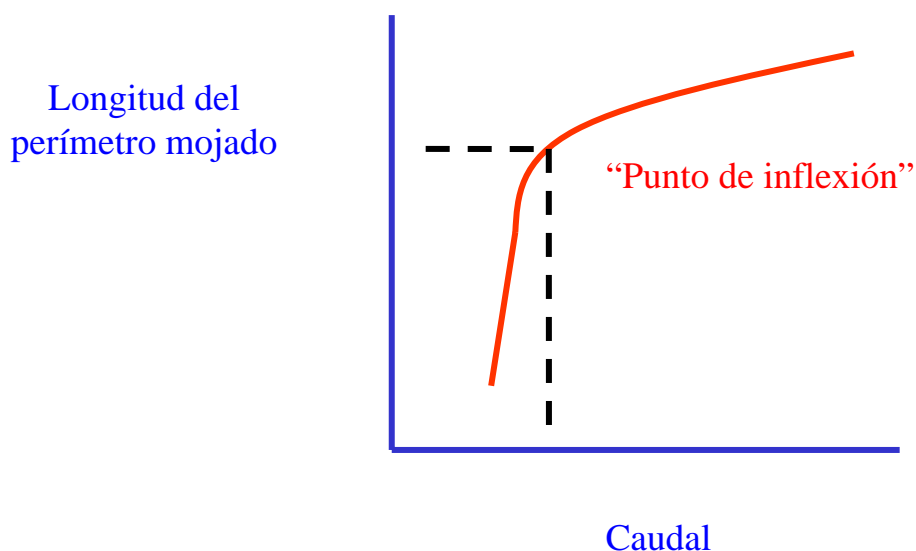


Figura 1. Relación entre el caudal y el perímetro mojado a partir de la cual se deduce el caudal mínimo.

La aplicación de este método requiere primero el desarrollo de la curva de cambio de caudal con el perímetro mojado, para lo cual hay que realizar un muestreo de la geometría de las secciones transversales críticas. Estas curvas se pueden desarrollar

<sup>1</sup> Desde un punto de vista matemático, llamarlo punto de inflexión es incorrecto, ya que un punto de inflexión se define como el punto en el que la curvatura de una curva cambia de signo, es decir, el punto donde la tasa de cambio de la primera derivada (pendiente) es cero (pasa de ser una curva convexa a cóncava o viceversa). De hecho, el punto que aquí se llama como punto de inflexión representa el punto de la curva de perímetro mojado frente a caudal en el que la tasa de cambio de la pendiente es máxima.



aplicando un modelo de flujo uniforme a las secciones transversales, o midiendo perímetros mojados bajo distintos caudales circulantes. Aunque el punto de inflexión se identifica más fácilmente utilizando este último método, los puntos que relacionan caudales y perímetros mojados tomados para desarrollar las curvas suelen ser pocos y los puntos de inflexión pueden corresponder más a una discretización grosera de la curva (no sería una curva continua) que a características físicas del cauce.

Esta metodología presenta una serie de problemas, algunos de ellos comunes a todos los métodos hidráulicos, que muchas veces dificultan o desaconsejan su utilización. Los principales inconvenientes son:

- Al promediar la relación entre perímetro mojado y caudal para las secciones críticas del tramo, en algunos casos se puede impedir la identificación de los puntos de inflexión basados en la caracterización física de las secciones al quedar enmascarados en el valor promedio.
- El caudal que define el punto de inflexión puede variar en función de la escala que se escoja para los ejes de representación (Gippel y Stewardson, 1996).
- No siempre existe dicho punto de inflexión, sino que más bien es una zona de inflexión o incluso en muchos casos presentan una transición gradual de la curva, con lo que la búsqueda de ese valor que indica una discontinuidad brusca es difícil y su valor depende de la persona que interprete la curva (da subjetividad al método) (Figura 2).
- El punto de inflexión no tiene un significado biológico claro. Además, no se sabe si la productividad biológica está controlada o al menos se ve afectada por cambios en el perímetro mojado.

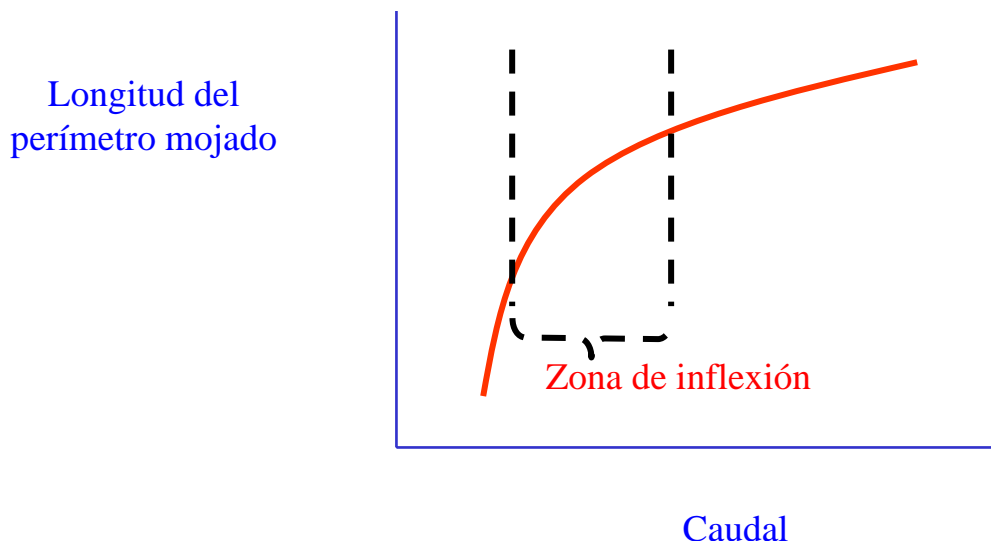


Figura 2. Ejemplo donde se muestra la existencia de una zona de inflexión donde se dificulta la determinación del caudal mínimo.

### **1.2.1.2 Otros métodos hidráulicos**

Swift (1976) eligió un parámetro que llamó “anchura de pie” (definido como “la distancia horizontal desde el punto donde el lecho del cauce y la ribera se juntan hasta la superficie de la otra ribera”) que encontró relacionado con caudales preferidos por la trucha para la freza, y que es más fácil de calcular en el campo que la relación entre perímetro mojado y caudal al ser un único parámetro a medir.

Otras formas de establecer caudales mínimos y que se pueden considerar como métodos hidráulicos serían el establecimiento de caudales que cumplan unos valores mínimos para ciertos parámetros hidráulicos como pueden ser el calado del agua (profundidad), sección del área de flujo o velocidad del agua, que por debajo de ciertos valores pueden ser limitantes. Un ejemplo de estas metodologías sería el método de Idaho (Cochner, 1976 y White, 1976, citados por Gordon *et al.*, 1992).

### **1.2.1.3 Discusión**

Los métodos hidráulicos tienen la ventaja de que a pesar de basarse en parámetros hidráulicos, incorporan información referente a los requerimientos de hábitat físico de las especies presentes. Son métodos sencillos de aplicación y que requieren relativamente pocos datos (normalmente secciones transversales en los puntos a estudiar así como mediciones de velocidad y profundidad de agua en las mismas, además de la utilización de modelos hidráulicos para la simulación de hábitats físicos bajo distintos caudales circulantes). Además, se trata de métodos lo suficientemente flexibles para ser aplicados tanto a diferentes especies del ecosistema acuático (aunque normalmente no se incluyen componentes de ribera) como actividades o estadios de desarrollo de las mismas, simplemente determinando sus requerimientos hidráulicos.

Sin embargo, estos métodos constituyen una visión muy simplista del problema al asumir que una única variable o grupo de variables hidráulicas pueden representar adecuadamente los requerimientos de caudal de las distintas especies. Además, la localización de la sección transversal y la elección del modelo hidráulico a aplicar para relacionar caudal con otros parámetros hidráulicos condicionan mucho los resultados obtenidos, los cuales no suelen ser generalizables espacial (distintas secciones y tramos de río no tienen por qué tener exactamente las mismas características) ni temporalmente (una misma sección varía a lo largo del tiempo debido a la propia dinámica fluvial).

## **1.2.2 MÉTODOS HIDROLÓGICOS**

### **1.2.2.1 Método Montana (Tennant, 1976)**

Este método es quizás el más conocido de los hidrológicos, y el segundo más popular en Estados Unidos, aplicándose en numerosos estados (Reiser *et al.*, 1989).

Basándose en los resultados de numerosos estudios llevados a cabo durante diez años en once ríos de los estados de Montana, Nebraska y Wyoming (E.E.U.U), Tennant (1976)

estableció el principio empírico de que un mismo porcentaje del caudal medio anual crea unas condiciones de hábitat para peces cualitativamente similares en distintos tramos de río. Consecuentemente, propuso una relación cuantitativa entre el porcentaje del caudal medio anual ( $Q_m$ ) y la calidad de hábitat recomendado para la vida piscícola, recreo y diversos usos del agua, partiendo de la afirmación de que el hábitat piscícola se ve altamente degradado con valores del caudal inferiores al 10% del  $Q_m$ .

Las recomendaciones de caudal según Tennant (1976) para las distintas épocas del año aparecen en la tabla 1.

Tabla 1. Recomendaciones de caudal según Tennant (1976) para las distintas épocas del año.

Caudal mínimo instantáneo en % del caudal medio anual		Criterio cualitativo	Observaciones
Oct-Mar	Abril-Sep		
< 10	< 10	Muy insuficiente	Severa degradación para la mayoría de los elementos del medio acuático
10	10	Débil	Mínimo: permite proteger temporalmente algunos hábitats para los organismos acuáticos
10	30	Aceptable	Caudal recomendado para mantener los hábitats y la vida acuática
20	40	Bueno	
30	50	Muy bueno	
40	60	Excelente	Particularmente para los primeros estadios de desarrollo de la mayoría de los organismos acuáticos y para la mayoría de usos recreativos
60-100	60-100	Rango óptimo	
200	200	Máximo	Valores mayores pueden causar severos procesos de erosión de ribera y degradación del ecosistema acuático

Tennant (1976) observó que la anchura de la lámina de agua, profundidad y velocidad del agua variaban en mayor medida al variar el caudal circulante entre los valores de 0 y 10% del  $Q_m$  que en cualquier otro rango de variación de caudal, y que como media, el 10% del  $Q_m$  cubría aproximadamente el 60% del máximo perímetro mojado. También observó que un caudal equivalente al 10% del  $Q_m$  proporcionaba profundidades y velocidades medias de 0.3 m y 0.23 m/s respectivamente, valores que consideraba estaban al límite de lo aceptable basándose en otros estudios realizados. También concluyó que un 30% del  $Q_m$  creaba un hábitat suficiente para la supervivencia de la mayoría de las formas de vida acuática ya que proporcionaba anchuras, profundidades y velocidades satisfactorias, y por otro lado la mayoría de las zonas poco profundas

(rápidos y orillas arenosas) quedaban cubiertas con suficiente agua para que los peces adultos pudieran moverse en ellas. Para caudales que representaban el 60% del  $Q_m$  Tennant esperaba que la mayoría del cauce estuviera cubierta con agua incluyendo las zonas poco profundas, y la mayoría de la ribera serviría como refugio para los peces. Así, Tennant concluyó que el 60% del  $Q_m$  proporcionaba condiciones de hábitat excelentes. Estas recomendaciones fueron obtenidas del análisis de cientos de regímenes de caudales en una gran variedad de tramos de río próximos a estaciones de aforo con diferentes regímenes de caudales en 21 estados diferentes durante el período de 1959 a 1976 (Tennant, 1976), lo que a la vez sirvió para comprobarlo y verificarlo experimentalmente, como se muestra en la figura 3.

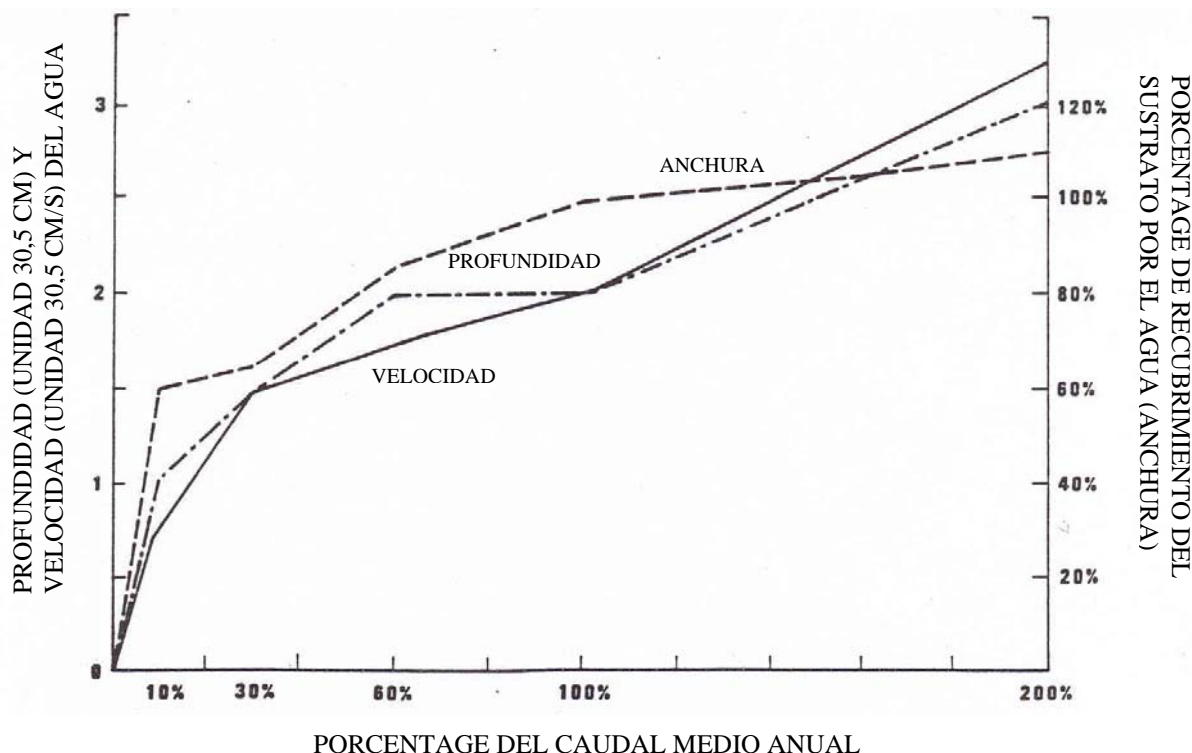


Figura 3. Comprobación y verificación experimental del método Montana. (Fuente: Tennant, 1976).

Una ventaja importante de este método es que el único dato que necesita para su aplicación es el caudal medio anual, el cual se puede obtener fácilmente de la red de estaciones de aforo de forma directa, o extrapolando a partir de parámetros conocidos en la mayoría de nuestros ríos. Sin embargo, presenta el inconveniente de que al haber sido elaborado para ríos que poseen rangos medios de caudales, y al no tener en cuenta la variabilidad estacional del régimen de caudales en nuestros ríos, puede recomendar en algunos casos valores de caudales mínimos difíciles de defender ya que no se ajustan a las características específicas para cada río (en ríos estables el 10% del  $Q_m$  puede dar valores muy pequeños, mientras que en ríos muy variables el 30% puede dar valores excesivamente altos). De hecho, existen estudios que muestran que el método sobrestima las recomendaciones de caudal mínimo en ríos con gran variabilidad estacional (Bietz *et al.*, 1985; Cuplin y Van Haveren, 1979). Aunque el autor concibió el método como una técnica para establecer caudales operativos en un tramo de río, el método puede ser usado para justificar un rango amplio de caudales, y las

recomendaciones basadas en ese rango no serán por tanto ni específicas para cada caso ni fáciles de defender (Morhardt, 1986).

### **1.2.2.2 Fórmula de Matthey y fórmulas asociadas**

Es una fórmula empírica basada en observaciones realizadas por Matthey en diferentes ríos suizos (UNESA, 1993), y se desarrolló para establecer el caudal que habría que mantener en un río para conservar el hábitat para peces. Para su cálculo se basa en el caudal más frecuente del curso de agua, ya que supone que la biología del mismo está adaptada a dicho caudal.

La forma general de la fórmula es:

$$Q_{min} = \frac{K * Q_{clas}}{(\ln Q_{clas})^2}$$

donde  $Q_{clas}$  es un caudal clasificado determinado, es decir, el caudal que es igualado o superado un determinado número de días al año. Normalmente se utiliza  $Q_{330}$  y  $Q_{347}$ , que corresponden aproximadamente al caudal circulante el 90 y 95% de tiempo respectivamente.

El Principado de Asturias, así como otros países europeos, desarrolló una legislación de caudales ecológicos basada en ecuaciones y parámetros similares a los utilizados en la fórmula de Matthey.

### **1.2.2.3 Método del $Q_{7,10}$ (Stalnaker y Arnette, 1976)**

Se basa en el análisis de la serie de caudales medios diarios de los últimos 10 años. El caudal mínimo recomendado sería el mínimo caudal medio de 7 días consecutivos en dicho periodo. Dicho caudal se puede obtener aplicando el método de análisis estadístico de las medias móviles de orden 7 a la serie de datos, y hallando el mínimo valor obtenido.

### **1.2.2.4 Otros métodos hidrológicos**

Aunque se han propuesto otros muchos métodos hidrológicos, éstos no han gozado de una aceptación tan generalizada como los anteriores, especialmente el de Tennant, incluyendo algunas de sus modificaciones. Así, Estes (1996) propuso una modificación del Método de Montana para su aplicación en Alaska, con la aportación del conocimiento de especialistas en datos de temporalidad en los requerimientos de caudal mínimo para peces en sus diferentes estadios de vida, estimaciones de duración de flujos y el uso de un parámetro hidrológico como es la media interanual de las medias mensuales de los caudales diarios.

Hoppe (1975) basó sus recomendaciones de caudales mínimos aceptables en el caudal medio diario que excede el 80% del tiempo. Este método ha sido criticado en cuanto a su arbitrariedad y falta de fundamento (Morhardt, 1986).

En el U.S. Fish and Wildlife Service (1981; citado por Orth y Leonard, 1990) establecieron un método (Aquatic Base Flow, ABF) que ha tenido una relativa difusión en Norteamérica, que utilizaba el caudal “mediana del mes de caudales mínimos (agosto)” para recomendar caudales mínimos.

El Programa de Recursos del Área de Northern Great Plains (1974; citado por Ghanem y Hicks, 1992) presentó un modelo similar recomendando un caudal mínimo para cada mes igual al caudal superado un 90% de los días del mes en cuestión para el período de registro, pero excluyendo del análisis aquellos meses con valores extremos de caudales medios mensuales (dentro del 15% superior e inferior). Este método también ha sido criticado por falta de datos en que basar los criterios elegidos, los cuales resultaron ser completamente arbitrarios (Morhardt, 1986).

Geer (1980) desarrolló un método para establecer caudales mínimos de invierno y verano en los ríos de Utah. El mínimo caudal permitido de invierno se basó en la media de los caudales mínimos mensuales de los meses de Octubre a Marzo, mientras que el caudal mínimo permitido de verano se obtuvo de la media de caudales mínimos mensuales de los meses de Abril a Septiembre.

Más recientemente, Richter *et al.* (1996, 1997) han desarrollado un método (Range of Variability Approach, RVA) que pretende caracterizar estadísticamente los parámetros del régimen de caudales que son relevantes desde un punto de vista ecológico y tienen un papel fundamental en el mantenimiento de los ecosistemas fluviales. Así, se definen 32 índices hidrológicos llamados Indicadores de Alteración Hidrológica fijando unos rangos de variación para los mismos (basados en la estimación del nivel máximo admisible de alteración) en función de los cuales se establecen los criterios de gestión de caudales.

Por su parte, Bérubé *et al.* (2002) han propuesto establecer un caudal de conservación para Québec en función de 6 parámetros descriptores de la cuenca vertiente, realizando previamente una regionalización ecohidrológica.

Por último, existen numerosos métodos que aun siendo citados normalmente en la bibliografía, tienen una aplicación muy específica en cuanto a la región o el contexto. Por ejemplo se podrían citar un método que recomienda caudales que excedan el caudal que representa el 2,5 – 5% del caudal medio interanual usado en Portugal (Alves y Henriques, 1994), u otro método que fija el caudal mínimo en función de la mediana de caudales mínimos anuales aplicado en Dinamarca (Miljoestyrelsen, 1979; citado por Jowett, 1997).

#### **1.2.2.5 Discusión**

En general, la principal crítica de los métodos hidrológicos recae en su incapacidad de tener en cuenta la variabilidad estacional o anual de caudales. Aquellos métodos que han intentado considerar al menos una variabilidad estacional han sido criticados por la forma arbitraria en que se han determinado los criterios utilizados.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que todavía hoy en día no se conoce con certeza cuanta agua se puede extraer de un río sin que se produzcan daños ambientales en el ecosistema fluvial, ni se conocen con precisión las relaciones del rango de caudales del régimen natural con los distintos elementos del dicho ecosistema (Martínez Santamaría, 2003), aunque si se empiezan a conocer órdenes de magnitud para ambas cuestiones. Por ello, dado que los métodos hidrológicos sólo pueden proporcionar directrices para describir el impacto de propuestas de cambio de caudal sobre hábitat para peces, o otros elementos ambientales objetivo, de una forma cualitativa, y que no pueden cuantificar el impacto sobre disponibilidad de hábitat o biomasa piscícola, probablemente no merezca la pena profundizar en los mismos para tratar de obtener valores muy precisos. Únicamente proporcionan órdenes de magnitud de caudales que muchas veces son más que suficientes para establecer recomendaciones y criterios de caudales mínimos. Sin embargo, su uso debería estar limitado a estudios de viabilidad al no proporcionar una evaluación específica para cada tramo de río de proyectos propuestos de gestión hidráulica, ni ninguna capacidad de predicción (Ghanem y Hicks, 1992).

No obstante, se trata de metodologías de fácil aplicación, generalmente de bajo coste y rápidas en su ejecución, que requieren únicamente registros históricos de caudal, y que están recomendadas para su aplicación a gran escala, es decir a nivel de planificación de grandes cuencas (King *et al.*, 1999).

### **1.2.3 MÉTODOS HIDROBIOLÓGICOS**

Dentro de los métodos hidrobiológicos se han incluido todas las metodologías que utilizan parámetros tanto hidrológicos como biológicos para el establecimiento de caudales mínimos. Estos métodos se pueden clasificar en dos grandes grupos: los métodos empíricos basados en el análisis estadístico de datos de parámetros relacionados con el hábitat físico, y los métodos basados en la simulación de hábitat físico.

#### **1.2.3.1 Métodos empíricos**

##### ***1.2.3.1.1 Método del índice de calidad de hábitat (HQI)***

Se trata de un método empírico basado en el análisis estadístico de datos procedentes de ríos para obtener un conocimiento sobre los factores que rigen la calidad de hábitat para la trucha. Fue desarrollado por Binns y Eiserman (1979) para predecir la biomasa de trucha en ríos de Wyoming (Estados Unidos) basándose en la hipótesis de que el mejor hábitat para la trucha está asociado con una producción de biomasa alta. Se recogieron datos de 44 puntos de muestreo en ríos de Wyoming para cubrir un amplio rango de tipos de hábitats. Los tramos muestreados variaban entre una elevación de 1146 y 3042 m, la anchura del cauce al final del verano variaba de 1.4 a 44 m, el caudal medio diario oscilaba entre 0.6 y 14.6 m<sup>3</sup>/s y las pendientes entre 0.1 y 10%.

Se realizaron análisis de regresión múltiple sobre 22 parámetros diferentes que representaban las características físicas, químicas y biológicas de los ríos. Los atributos

estudiados fueron trece atributos físicos (caudal de final de verano, variación del caudal anual, temperatura máxima del agua en verano, velocidad del agua, turbidez, refugio, anchura de la lámina de agua, profundidad, morfología del cauce, erosionabilidad de las orillas, condición del substrato, tipo de material del lecho y sedimentación de limos), cinco químicos (contenido en nitratos, alcalinidad total, fósforo total, sólidos disueltos totales e iones nitrogenados) y cuatro biológicos (vegetación de ribera y abundancia, diversidad y tipo de alimento para peces).

La determinación de algunos de los atributos requirió una previa definición de los mismos. El caudal de final de verano fue calculado comparando el caudal medio diario de agosto y primera mitad de septiembre con el caudal medio diario de todo el año. Una proporción inferior al 10% se consideró inadecuada para albergar trucha (similar a la propuesta del método de Montana), mientras que si era mayor del 55% se consideró completamente adecuada. La velocidad del agua se calculó como la que se obtenía de la longitud del tramo estudiado dividido por el tiempo que un marcador fluorescente tardó en recorrer dicha distancia. Refugio fue identificado como cualquier aspecto o cosa que permitió a las truchas eludir el impacto de enemigos o elementos del medio (Binns y Eiserman, 1979) tales como profundidad de agua, turbulencia superficial, substrato suelto, grandes rocas y otros elementos sumergidos, cuevas en orillas, vegetación acuática y terrestre en galería, ramas muertas y otros restos de plantas en el cauce (una definición muy amplia y subjetiva). El porcentaje de orilla erosionada se estimó dividiendo la suma de longitud de tramos en los que se observó erosión en la ribera por la longitud total de la ribera del tramo estudiado. La condición del substrato se obtuvo basándose en la disponibilidad de vegetación acuática sumergida (incluyendo algas y líquenes sobre rocas).

A cada atributo se le asignó un número entero de 0 (peor) a 4 (mejor) que representaba su idoneidad para la trucha. De estos atributos, se eligieron los que mostraron mayor correlación con la producción de trucha (con un coeficiente de regresión múltiple mayor de 0.3 con un nivel de confianza del 0.95) para construir dos modelos de predicción empíricos.

El primer modelo (Modelo I) se desarrolló a partir de los datos obtenidos de los puntos de muestreo 1 a 20, y verificado en los puntos 21 a 36. Este modelo relaciona 10 atributos de hábitat con la biomasa de trucha a través de la ecuación:

$$\log_{10}(Y + 1) = 1.12085 \left\{ -1.18257 + \sum_{i=1}^3 a_i \log_{10}(X_i + 1) + b \log_{10}(G + 1) \right\}$$

Donde:

Y = producción de trucha;

X<sub>1</sub> = clase de idoneidad del caudal de final de verano;

X<sub>2</sub> = clase de idoneidad de la variación de caudal anual;

X<sub>3</sub> = clase de idoneidad de la temperatura máxima del agua en verano;

X<sub>4</sub> = clase de idoneidad del contenido en nitrógeno en forma de nitratos;

X<sub>5</sub> = clase de idoneidad de la abundancia de alimento;

X<sub>6</sub> = clase de idoneidad de la diversidad de alimento;

X<sub>7</sub> = clase de idoneidad de refugio;

X<sub>8</sub> = clase de idoneidad de orillas erosionadas;

X<sub>10</sub> = clase de idoneidad de la velocidad del agua;



$X_{11}$  = clase de idoneidad de la anchura del cauce;

$G = (X_4) (X_5) (X_6) (X_7) (X_8) (X_{10}) (X_{11})$ ;

$a_1 = 0.97329$ ;

$a_2 = 1.65824$ ;

$a_3 = 1.44821$ ;

$b = 0.30762$ ;

Hay que aclarar que el factor 1.12085 se utiliza para pasar de libras/acre a kg/ha.

En el Modelo II, los atributos  $X_5$  y  $X_6$  utilizados en el Modelo I fueron sustituidos por el atributo  $X_9$  (substrato). También se reemplazó el factor  $G$  por el índice de cobijo  $J = (X_7) (X_8) (X_{11})$  y el índice de alimento  $L = (X_3) (X_4) (X_9) (X_{10})$ . De nuevo se aplicó un análisis de regresión múltiple a los datos obtenidos de los puntos de muestreo 1 a 36 y se obtuvo la siguiente expresión:

$$\log_{10}(Y + 1) = 1.12085 \left\{ -0.903 + \sum_{i=1}^3 c_i \log_{10}(X_i + 1) + d \log_{10}(J + 1) + e \log_{10}(L + 1) \right\}$$

Donde:

$c_1 = 0.807$ ;

$c_2 = 0.877$ ;

$c_3 = 1.233$ ;

$d = 0.631$ ;

$e = 0.182$ ;

El Modelo II fue verificado en los puntos de muestreo 37 a 44 y se encontró que explicaba el 96% de la variación en la producción de trucha ( $R = 0.983$ ).

Los autores también utilizaron el método para entender los cambios potenciales en hábitat que se producirían como consecuencia de un proyecto de derivación de agua y para evaluar el potencial de mejora de hábitat. Sin embargo, no se menciona como se pueden predecir los cambios en las variables como consecuencia de dichos proyectos. Para que el método sea útil en ese tipo de aplicaciones, se requieren algún tipo de herramientas para predecir cambios en los atributos involucrados en los modelos empíricos. Entre estas herramientas podemos encontrar los diferentes modelos hidráulicos, así como modelos para predecir cambios en temperatura y calidad de aguas.

En principio, este método debería funcionar y ser de gran utilidad en otras áreas además de Wyoming. Sin embargo, Bowlby y Roff (1986) probaron los dos modelos para la biomasa de trucha en ríos de Ontario y encontraron unos resultados muy pobres, ya que estos modelos explicaban sólo el 6.7 y 9.2% de la variación de biomasa de trucha en los ríos de Ontario. Bowlby y Roff también encontraron que únicamente los atributos caudal al final del verano, variación del caudal anual y temperatura máxima del agua en verano estaban correlacionados de forma significativa con la biomasa de trucha en Ontario, mientras que Binns y Eiserman (1979) encontraron que de los once atributos de los dos modelos, los únicos que no estaban correlacionados significativamente con biomasa de trucha eran caudal al final del verano y temperatura máxima del agua en verano. Bowlby y Roff concluyeron que los factores que limitaban la biomasa de trucha en ríos de Wyoming y del sur de Ontario eran claramente diferentes, lo que indicaría

que este modelo empírico sólo es válido en el mejor de los casos a nivel regional, y puede variar su formato de una forma radical ya que en diferentes regiones, o incluso en diferentes ríos dentro de una misma región, los aspectos del hábitat que resultan ser críticos o limitantes para especies determinadas pueden ser muy diferentes (Hogan y Church, 1989). Por lo tanto, el método HQI desarrollado por Binns y Eiserman (1979) no presenta un modelo predictivo general para la evaluación de hábitat para peces. Es un modelo empírico para la predicción de biomasa de trucha en ríos de Wyoming. Se podrían desarrollar nuevos modelos para otras especies y/o regiones siguiendo una metodología similar, aunque serían válidos igualmente de forma local. Se necesita una mayor investigación y experimentación para identificar los atributos que están correlacionados con la biomasa de peces para desarrollar fórmulas empíricas.

Con respecto a la componente hidráulica de los modelos empíricos del método HQI, hay que decir que de las cuatro variables (profundidad, anchura, caudal y velocidad), determinísticamente hablando, una es redundante (sólo se necesitarían tres). Sin embargo, como la regresión se realiza con variables que representan la idoneidad de estos parámetros hidráulicos más que de las variables físicas mismas, esta redundancia podría no afectar a la significación estadística de los modelos propuestos.

#### **1.2.3.1.2 Otros métodos empíricos**

Además del descrito, se han propuesto numerosos métodos empíricos que utilizan variables tanto hidrológicas como hidráulicas, químicas o biológicas. Por ejemplo, Layher (1983; citado por Ghanem y Hicks, 1992) presentó una serie de relaciones empíricas basadas únicamente en variables químicas para predecir la producción piscícola de diferentes especies en ríos de las llanuras de Kansas, así como otras relaciones que incluían también variables físicas como anchura media, porcentaje de rápidos y pozas y turbidez. Rabern (1984; citado por Ghanem y Hicks, 1992) presentó otra colección de relaciones empíricas para predecir la producción piscícola de varias especies en ríos de Georgia utilizando variables hidráulicas, químicas y biológicas. White *et al.* (1976) desarrollaron relaciones empíricas para trucha en ríos del centro-oeste de los Estados Unidos. Las relaciones se apoyaban sobre variables de flujo como el caudal medio mensual, caudal máximo mensual, caudal máximo diario y caudal máximo momentáneo.

En España también se han realizado intentos de aproximación al problema en este sentido, como por ejemplo el de la Universidad de Barcelona, que han sufrido grandes críticas y no han gozado de mucho reconocimiento (Sosota *et al.*, 1995).

Aunque estos métodos empíricos consideran parámetros hidráulicos en sus regresiones, no emplean modelos hidráulicos.

#### **1.2.3.2 Métodos basados en la simulación de hábitats**

El más extendido es la metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) (Bovee, 1982; Bovee *et al.*, 1998) basada en la cuantificación del hábitat físico en función de parámetros biológicos de preferencias que caracterizan las condiciones

hidráulicas a través de simulaciones. A continuación se expone el PHABSIM, método informático del hábitat potencial útil que está basado en los conceptos de IFIM.

### 1.2.3.2.1 Modelo conceptual del PHABSIM

El modelo conceptual utilizado en la metodología PHABSIM se basa en la compartimentación del tramo representativo objeto de estudio en secciones, y en ellas un mosaico de celdas transversales cuya longitud y anchura se determinará *in situ*. Cada celda identificada en el tramo tendrá una profundidad, velocidad, substrato, refugio y dimensiones determinadas y distintas de las demás, y al simular otros caudales circulantes por el tramo los valores de dichos parámetros variarán. De esta forma se tiene una idea de las características del tramo según varían los caudales a través del análisis de las secciones. A continuación se repasará brevemente la forma de operar de esta metodología en una dimensión (la más utilizada en Europa con el PHABSIM según Koboltschnig *et al.*, 2002, citado por Diez, 2004), aunque la combinación con modelos hidráulicos multidimensionales permiten simular el hábitat físico en 2 y 3 dimensiones (Hardy, 1998; Addley y Hardy, 2002; Diez, 2004).

Para estimar el hábitat físico a partir de estas características, se utilizan criterios de predilección de hábitat para definir un índice de preferencia de profundidad, velocidad, tipo de refugio y substrato para cada celda y para cada especie o incluso estadio de vida de la especie. Estos índices de preferencia univariantes se combinan matemáticamente para obtener un índice de preferencia compuesto para cada celda que normalmente se expresa en una escala de 0 a 1. Cuando el índice de preferencia compuesto se multiplica por el área de la celda, se obtiene el área ponderada útil (APU):

$$APU_{Q,s} = \sum_{i=1}^n (a_{i,Q})(csi_{i,Q,s})$$

donde  $APU_{Q,s}$  es el área ponderada útil del tramo con un caudal  $Q$  para la especie  $s$ ,  $a_i$  es el área de la celda  $i$ , y  $csi_{i,Q,s}$  es el índice de preferencia compuesto de la celda  $i$  para el caudal  $Q$  para la especie  $s$ . Por defecto se puede calcular el índice de preferencia compuesto como el producto de las preferencias para cada variable de hábitat utilizada:

$$csi = (si_p)(si_v)(si_{ci})$$

donde  $si_p$  es el índice de preferencia para la profundidad de la célula,  $si_v$  es el índice de preferencia para la velocidad de la célula y  $si_{ci}$  es el índice de preferencia para las características del cauce de la célula (normalmente refugio o substrato). Otras opciones serían calcularlo a través de la media geométrica de los índices de preferencia univariantes, o elegir el índice de preferencia mínimo como el  $csi$ .

El área ponderada útil se puede calcular para un rango de caudales y para una o varias especies seleccionadas (para uno o más estadios de desarrollo), de manera que se puede establecer una relación entre caudal y hábitat físico creado para los organismos objeto de estudio.

### 1.2.3.2.2 Criterios de preferencia de hábitat

Uno de los pilares de esta metodología es el desarrollo de unos criterios de preferencia de hábitat para las variables consideradas y para la o las especies que se estén evaluando. Los criterios de preferencia se pueden presentar de varias formas. La forma más simple consiste en un formato binario en el cual se establece un rango de una variable continua (por ejemplo profundidad, velocidad, etc.), de forma que si el valor de la variable cae dentro del rango se asigna una preferencia de 1, y si cae fuera del mismo tendría una preferencia de 0.

Otra forma de presentar los criterios de preferencia es a través de una curva de preferencia univariante donde se recogen situaciones intermedias entre la preferencia óptima del organismo para esa variable y las condiciones evitadas por el mismo. Este formato ha sido y es el más utilizado para representar las preferencias de las especies, aunque también tiene sus inconvenientes. Por ejemplo, el hecho de que trata las variables como independientes e ignora posibles interacciones significativas entre variables, o el hecho de que el área ponderada útil combina elementos de cantidad de hábitat con calidad de hábitat, con lo que una gran superficie de hábitat de baja calidad puede producir la misma APU que poca cantidad de hábitat de gran calidad (Morhardt y Mesick, 1988). Por ello, a veces se suele abordar el establecimiento de criterios de preferencia a través de un análisis multivariante, donde se ajusta una función matemática a datos de frecuencia de dos o más variables a la vez, y que se suele expresar en la forma de una ecuación polinómica exponencial:

$$P_{(p,v)} = \frac{1}{N} e^{-(a_1 p + a_2 v + a_3 p^2 + a_4 v^2 + a_5 pv)}$$

donde  $P_{(p,v)}$  es la probabilidad conjunta de utilización de una combinación de profundidad y velocidad,  $N$  es un término de normalización que reduce el área por encima de la superficie de respuesta a la unidad, y  $a_i$  son parámetros de mínimos cuadrados para los términos  $v$ ,  $p$  y  $pv$ .

En cuanto a la información necesaria para desarrollar los criterios de preferencia, ésta puede obtenerse de varias formas:

- Derivada de la experiencia personal y opinión profesional, o de definiciones consensuadas a través de mesas redondas u otro tipo de procedimientos más formales como la realización de encuestas a paneles de expertos tipo DELPHI (Zuboy, 1981).
- Basándose en la distribución de frecuencias de variables de hábitat medidas en el campo en lugares utilizados por la especie considerada (curvas de preferencia de categoría I).
- Basándose en la distribución de frecuencias de variables de hábitat medidas en el campo en lugares utilizados por la especie considerada, pero teniendo en cuenta además la disponibilidad de esos lugares a través de índices de elección del tipo (curvas de preferencia de categoría II):

$$E = \frac{U}{A}$$

donde  $E$  es el índice de elección,  $U$  es la proporción de unidades de hábitat usadas por la categoría  $i$  (por ejemplo profundidades entre 1 y 1.5 m), y  $A$  es la proporción de unidades de hábitat de la categoría  $i$  disponibles en el la muestra.

#### **1.2.3.2.3 Modelo de hidráulica fluvial**

Constituye otro de los elementos principales de la metodología, al relacionar los distintos caudales circulantes con una serie de parámetros físicos e hidráulicos (profundidad, velocidades, sección de flujo, anchura del cauce, tipo de substrato, etc.) que se utilizarán para determinar el hábitat físico.

Estos modelos parten de la descripción de la morfología del cauce a través de la realización de una serie de secciones transversales del río que caracterizan tramos homogéneos del mismo. A continuación se realizaría el estudio de las condiciones hidráulicas, para lo cual hay que determinar el caudal circulante (a través del análisis de profundidades y velocidades del flujo) así como el coeficiente de rugosidad del cauce. Finalmente, mediante la aplicación de un modelo de simulación hidráulica (existe una gran variedad de modelos, desde modelos sencillos a otros más precisos, como por ejemplo HEC-RAS, MANSQ, WSP, etc.) se pueden establecer relaciones que ponen de manifiesto cómo varían los diferentes parámetros hidráulicos (en definitiva el hábitat físico) al variar el caudal.

#### **1.2.3.2.4 Criterios para el establecimiento de caudales mínimos**

Algunos autores se han basado en las gráficas que relacionan caudales con área ponderada útil para establecer los caudales mínimos que deben circular para mantener la estructura, composición y funcionamiento del ecosistema acuático. Un ejemplo lo podemos ver en una aplicación y puesta a punto de esta metodología en nuestros ríos de la Península Ibérica, en la cual se establecen cuatro criterios diferentes (García de Jalón 1990; González del Tánago y García de Jalón, 1995):

- Caudal mínimo absoluto capaz de soportar tanto vida piscícola como invertebrada: aquel que genera una APU de 1m. Este valor correspondería al estado adulto. Para aplicarlo a los demás estadios (juveniles, alevines y frezaderos) habrá que multiplicar el valor obtenido por un factor de corrección (0.8, 0.3 y 0.1 respectivamente).
- Caudal mínimo de estiaje: aquel que genera una APU mayor que el 50% de la anchura del cauce en condiciones de estiaje, utilizando los mismos factores de corrección que en el caso anterior para los distintos estadios.
- Caudal mínimo óptimo: punto de ruptura de pendiente en la curva APU/Q a partir del cual variaciones de caudal no alteran significativamente la cantidad de APU creada. Este punto define la zona donde pequeñas variaciones de caudales generan grandes diferencias de APU.

- Caudal aconsejable: aquel capaz de mantener una biomasa o producción piscícola mínimas en cada caso según los fines perseguidos, para lo cual lo primero que habría que establecer es una relación entre la biomasa piscícola y la APU.

#### 1.2.3.2.5 Ventajas y limitaciones

Los métodos hidrobiológicos y en especial el IFIM tienen una serie de ventajas que les ha convertido desde los años 80 en una herramienta muy utilizada y apreciada alrededor del mundo y especialmente en Estados Unidos para evaluar los efectos que produce una modificación del régimen de caudales sobre la cantidad de hábitat físico de distintas especies acuáticas y en distintos estadios de desarrollo o actividad (Jowett, 1997). Al estar la metodología informatizada, es capaz de procesar gran cantidad de datos de tipo hidrológico, hidráulico y biológico de una forma estandarizada pero a la vez interactiva y flexible. Además, los resultados que se obtienen por estos métodos cada vez tienen un mayor nivel de resolución espacial y temporal a medida que se avanza en la modelización hidráulica especialmente cuando se incorporan componentes bi y tridimensionales (Ghanem *et al.*, 1996; Schneider y Nestler, 1996; Tarbet y Hardy, 1996).

Sin embargo, estas metodologías no han estado exentas de críticas, incluyendo las de los propios autores que reconocen sus limitaciones. La primera es que no se ha demostrado que exista relación entre la cantidad de hábitat que mide el PHABSIM y la biomasa de peces (Mathur *et al.*, 1984). Por otro lado, está demostrada la enorme variabilidad del método según los criterios y metodologías de medición y los modelos hidráulicos utilizados (Gan y Macmahon, 1990; Bourgeois *et al.*, 1996). Incluso la utilización de modelos hidráulicos 2D que mejoran notablemente las predicciones hidráulicas, no está demostrado que repercutan en una mejor estimación del hábitat físico (APU) (Diez, 2004). Hay que tener en cuenta además que en ríos con una variabilidad temporal y espacial muy acusada, como ocurre en la mayoría de los de nuestra península, la aplicación de estas técnicas de cuantificación del hábitat pueden dar lugar a resultados que sólo tienen sentido para el lugar y el momento precisos en que fueron obtenidos, puesto que se trata de ríos que de un año a otro experimentan grandes cambios en las características hidráulicas de la sección o tramo, y por lo tanto en la cantidad de hábitat piscícola. Por último, la interpretación de resultados para el establecimiento de un caudal mínimo entraña una relativa dificultad y arbitrariedad ya que la metodología no da un único valor para el ecosistema fluvial, sino distintos valores para cada especie presente (las preferencias de hábitat entre ellas normalmente no coinciden) e incluso para cada clase de edad o condición dentro de la misma especie (normalmente freza, alevines, juveniles y adultos para peces). Por lo tanto, la selección de la especie de referencia, de las curvas de preferencia a aplicar (que hayan sido desarrolladas para esa especie en ese río o región) y de la vocación del tramo de río en estudio (o vocaciones, ya que hay tramos de río con vocación múltiple, es decir, sirven para freza, alevinaje, desarrollo de juveniles, valores estéticos, ...) añade un nuevo problema a la aplicación de la metodología además de incorporar limitaciones (Jowett, 1997).

Puede concluirse por tanto que la utilización del PHABSIM para el cálculo de caudales “ecológicos” no es, ni mucho menos, paradigma de garantía de resultados precisos, como de hecho promulga el mismo Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) donde se acuñó la metodología en su página web explicativa del método IFIM, sino que

se trata de una herramienta de cuantificación de hábitat que resulta muy útil a la hora de explicar cambios debido a la variación de caudales (<http://www.mesc.usgs.gov/rsm/IFIM.html>).

#### **1.2.3.2.6 Otros métodos hidrobiológicos**

En la última década se han desarrollado y aplicado en diversos países numerosas metodologías similares a IFIM, pudiéndose considerar muchas de ellas como variantes de la misma. Entre ellas podemos citar el River Hydraulics and Habitat Simulation Program (RHYHABSIM; Jowett 1989, actualizado en 1995) desarrollado en Nueva Zelanda y que es una versión simplificada del PHABSIM, el Computer Aided Simulation Model for Instream Flow Requirements (CASIMIR; Jorde 1996), que aun estando todavía en fase de desarrollo ha tenido un cierto reconocimiento internacional, el Evaluation of Habitat Method (EVHA; Ginot 1995, citado por King *et al.*, 1999) o el River Simulator System (RSS; Alfredsen 1998, citado por King *et al.*, 1999).

A nivel nacional, Docampo y G. De Bikuña (1995) desarrollaron un método para los ríos de la Comunidad Autónoma del País Vasco, donde se utiliza además de modelos de simulación hidráulica, una curva de regresión de la riqueza de especies de invertebrados del bentos en función del perímetro mojado y del grado de irregularidad del cauce. No obstante, los propios autores reconocen las limitaciones de este modelo y la dificultad de su aplicación en otros lugares (Docampo, 1999).

### **1.2.4 MÉTODOS HOLÍSTICOS**

Estas metodologías surgieron como respuesta al cambio en la concepción de la ordenación de los recursos hídricos hacia una aproximación de tipo holístico donde se tiene una visión global del río en la cual entran a formar parte todos los componentes del ecosistema fluvial.

#### **1.2.4.1 Building Block Methodology (BBM) (King y Louw, 1998; King *et al.*, 2000)**

Más que una metodología de cálculo que nos da un valor de los caudales mínimos, constituye un procedimiento o forma de trabajo para llegar a obtener esos valores de caudales. Se basa en las siguientes premisas:

- La biota asociada a un río está adaptada al régimen de caudales bajos que normalmente circulan por ese río y depende de las condiciones de caudales altos que circulan eventualmente de forma natural.
- La identificación de los componentes más importantes del régimen natural de caudales y su incorporación al régimen de caudales gestionados ayudará a mantener la biota y funcionamiento natural del río, así como su estructura y diversidad de biotopos físicos.

Los pasos a seguir en la metodología son los siguientes:

- Recogida de datos y preparación de las reuniones de trabajo. Incluye la identificación del área de estudio y selección de los tramos o puntos donde se centrará la mayor parte del estudio, y su caracterización en términos de su importancia a nivel local y regional, aspectos sociales (relación de las comunidades rurales con el ecosistema acuático), geomorfológicos (diversidad de tramos en términos geológicos, forma del canal o biotopos físicos), de calidad de agua, biológicos (distribución, características y requerimientos de las especies presentes de peces, comunidades vegetales de ribera e invertebrados acuáticos, a parte de otras especies presentes de mamíferos acuáticos, pájaros, reptiles, anfibios o macrófitas de interés que puedan existir), hidrológicos (régimen natural y actual de caudales diarios) e hidráulicos (secciones transversales y curvas de gasto de los puntos seleccionados). Por último, hay que establecer las condiciones en las que se desea mantener el río en el futuro una vez esté gestionado a través de reuniones de trabajo con representantes de los organismos de la Administración competentes en materia de aguas, bosques, turismo y conservación de la naturaleza y basándose en los datos recogidos.
- Reuniones de trabajo en grupos de aproximadamente 20 personas incluyendo gestores del agua, ingenieros, hidrólogos, expertos en modelización hidráulica y científicos involucrados en la recogida de datos de los aspectos del apartado anterior. En estos grupos de trabajo se visita cada punto donde se va a aplicar la metodología e intercambian información para tener una mejor idea de todos los requerimientos y condicionantes a la hora de establecer caudales mínimos. A continuación, cada especialista expone el caudal mínimo desde su perspectiva para cada mes que tendría que circular por el río y se define el régimen de caudales (caudales mínimos, máximos, de limpieza del cauce, etc.) mensualmente que cumpla todos los puntos de vista considerados para satisfacer las condiciones objetivo que se establecieron en el apartado anterior para cada punto o tramo de río. Así se obtienen un régimen de caudales mínimos y otro de máximos para un año “normal” hidrológicamente y para un año seco, constituyendo los cuatro bloques fundamentales de la metodología. Por último, se comprueban los resultados para ver si son ambientalmente aceptables y evitar cualquier incongruencia en los caudales propuestos de un tramo respecto a los de otro.
- Finalmente, habría que integrar los requerimientos ambientales analizados en los apartados anteriores dentro del balance hidrológico total de la cuenca, teniendo en cuenta otros posibles usos del agua como puedan ser para abastecimiento de poblaciones, regadíos, industrias, demandas de la sociedad basadas en parámetros estéticos o culturales, etc. y establecer el régimen final de caudales circulantes para el río. Un ejemplo de su aplicación en la gestión de un embalse puede consultarse en Hughes *et al.* (1997) y en Hughes y Ziervogel (1998).

#### **1.2.4.2 Otros métodos holísticos**

Existe un número elevado de procedimientos holísticos que comparten con el BBM su filosofía y procedimientos metodológicos (Arthington, 1998; King *et al.*, 2000), diferenciándose unos de otros en cuanto a la estructura del protocolo de aplicación y la fijación de criterios en el análisis de los valores de conservación objetivo (Palau, 2003). Entre estas metodologías se pueden citar el *Holistic Approach*, el *Expert Panel Assessment Method* (EPAM) y el *Scientific Panel Assessment Method* (SPAM) desarrollados en Australia, el *Downstream Response to Imposed Flor Transformations*



*Methodology* (DRIFT) desarrollado en Sudáfrica, o el *River Babingley Method* desarrollado en Inglaterra (King *et al.*, 2000).

La mayoría de estas metodologías holísticas se pueden considerar según algunos autores (por ejemplo Arthington *et al.*, 1998) como métodos *bottom-up*, donde el régimen de caudales ambientales se construye por sumatorio de requisitos de caudales para los distintos objetivos, a partir de un nivel de caudal nulo. Por el contrario, en las metodologías consideradas *top-down* (muchas de las incluidas en los grupos anteriores) se establecen los caudales ambientales determinando la detracción de caudales máxima que se puede conseguir respecto al régimen natural.

#### **1.2.4.3 Ventajas y limitaciones**

Estas metodologías suponen un marco de trabajo muy válido que responde además a las demandas actuales de la sociedad, las cuales van dirigidas a un aprovechamiento integral del recurso hídrico integrando múltiples usos del agua y teniendo en cuenta múltiples puntos de vista.

Sin embargo, estas metodologías no pueden considerarse como un método de cálculo de un régimen de caudales mínimos para ríos ya que no nos da un valor concreto, sino que depende de la opinión de los especialistas en cada caso. Además, presentan una serie de limitaciones en su aplicación como son:

- Debido a que estos métodos consisten básicamente en un estudio individualizado de cada caso por expertos, para su correcta aplicación requieren un profundo conocimiento del medio y/o un periodo de tiempo largo para adquirir toda la información necesaria además de la implicación de un número elevado de especialistas en las disciplinas y factores del medio estudiados. Además, habría que incluir la más que posible evolución del ecosistema fluvial debido al cambio en el régimen de caudales. Por lo tanto, su aplicación de forma extensiva se tendría que abordar a largo plazo.
- Se dejan una serie de puntos a discreción del criterio de los expertos pero sin resolver metodológicamente en la propuesta. Entre estos puntos se pueden citar las condiciones en las que se desea mantener el río en el futuro (objetivo de la gestión) o el establecimiento de los requerimientos de caudal mínimo y régimen de caudales adecuado para las distintas especies biológicas, aspectos que conforman precisamente los pilares de cualquier metodología de determinación de caudales mínimos.
- Proponen como parte de la metodología la utilización en distintas fases de otras metodologías ya descritas con sus limitaciones e inconvenientes. Por ejemplo, en una fase inicial BBM propone la utilización del método de Montana (Tennant, 1976) o el análisis de curvas de duración-frecuencia de caudales (Gordon *et al.*, 1992) para una primera aproximación a la estimación de caudales, o la utilización de la metodología IFIM en el análisis de los requerimientos de hábitat y su relación con el caudal circulante de determinadas especies concretas para análisis más profundos cuando se trate de ríos con máxima prioridad de conservación tal y como proponen otros autores (Orth y Maughan, 1982; King y Louw, 1998).

No obstante, se trata de metodologías nuevas que están desarrollándose en los aspectos en que no están todavía bien definidas a medida que se van aplicando a casos concretos. Así, a través de su puesta en práctica se ha profundizado en temas como los requerimientos geomorfológicos de caudales mínimos (Rowntree y Wadeson, 1998), la incorporación de los conceptos de magnitud-frecuencia de los caudales naturales al régimen de caudales modificado (Hughes, 1999), o la integración de los requerimientos de acuíferos con otros componentes de los ecosistemas fluviales como los humedales (Parsons, 1998; citado por King *et al.*, 1999).

### **1.2.5 OTROS MÉTODOS**

Además de los métodos incluidos en los cuatro grupos anteriormente descritos, existen una serie de metodologías que se pueden considerar combinaciones de algunas de las anteriores (principalmente de los tres primeros), al tener en consideración variables de naturaleza hidrológica, hidráulica e hidrobiológica.

Entre estos métodos podemos considerar un método ecohidrológico para la determinación del caudal de conservación de hábitats de peces en ríos de Québec (Canadá) (Bérubé *et al.*, 2002). Este método se basa en la realización de una regionalización ecohidrológica fruto de la superposición de dos regionalizaciones, una basada en parámetros ecológicos y otra en hidrológicos. En cada región se establece una ecuación de regresión múltiple para extrapolar el caudal de conservación en función de una serie de parámetros descriptores del curso fluvial y la cuenca vertiente, utilizando distintos criterios de caudal de conservación en función de las especies y su ciclo biológico a lo largo del año.

Dentro de nuestro país también encontramos ejemplos de estos métodos, como la metodología CAHN (Caudales Adaptados al Hidrograma Natural) que se basa en el análisis de tres apartados, el hidrológico, el hidráulico y el biótico para el establecimiento de caudales ecológicos (García de Vicuña, 2003).

Por último, existen una serie de metodologías que divergen con la mayoría de las anteriormente expuestas al no tener como objetivo establecer la relación entre el caudal y el hábitat acuático, especialmente para peces (Tharme 1996, citado en Tharme, 2002). Estas metodologías, que a veces se integran dentro de las llamadas holísticas, se centran para el establecimiento de caudales ecológicos en otros aspectos del ecosistema acuático como la vegetación de ribera (McCoster, 1998), uso social (Pollard, 2000), fauna de ribera (Tharme, 2000), procesos de geomorfología fluvial (Brizga, 1998), o valores estéticos, recreativos o culturales (Tharme, 2002).

## **1.3 ANTECEDENTES DE REGIONALIZACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS**

La Cuenca del Ebro presenta una gran variedad territorial (a nivel geomorfológico, climático, etc.) que hace necesaria una regionalización de la misma como paso previo a cualquier intento de análisis y generalización de resultados de caudales ecológicos a nivel de cuenca, tal y como establece la Directiva marco del Agua en cuanto a la

necesidad de crear una tipología de ríos para futuros objetivos de conservación (Baeza, 2002).

Existen numerosos estudios donde se muestra la relación entre variables de la cuenca vertiente, especialmente las relacionadas con el suelo y el movimiento del agua a través de este elemento, la vegetación y orografía de la cuenca, con el régimen de caudales de estiaje (por ejemplo Nathan y McMahon, 1992; O'Shea, 1995; Lacey y Grayson, 1997). Y son precisamente las variables geomorfológicas, bióticas, climáticas o hidrológicas las que se han utilizado habitualmente para realizar regionalizaciones de cuencas hidrográficas cuyo objetivo principal era la zonificación del territorio en regiones homogéneas que agrupen ríos, o tramos de río, con regímenes semejantes (por ejemplo Huang y Ferng, 1990; Andrade, 1999; Renschler *et al.*, 2001).

Como antecedente más cercano, al menos espacialmente, se puede citar un estudio realizado en la propia Cuenca del Ebro por la Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro para la delimitación de regiones ecológicas (OPHCHE, 1999), siguiendo las propuestas de la Directiva Marco del Agua. El objetivo de este estudio era la división del territorio no en ecoregiones definidas según el sistema tradicional, en base principalmente a la vegetación y los tipos de suelo, además de la climatología o la geomorfología (Bailey, 1989), sino en regiones hidrológicas o de ecosistemas fluviales. Para ello, primeramente se hizo una subdivisión de la cuenca usando parámetros fisiográficos, para posteriormente verificar en cada región las características fisicoquímicas de las aguas y la distribución de la fauna. Así se comprobó la coherencia de esta división, estableciendo seis regiones definitivas donde fijar objetivos de calidad biológica de las aguas o biodiversidad. Existen otros ejemplos que utilizan estas técnicas de subdivisión de cuencas para fijar objetivos de gestión en base a la calidad o características de las comunidades biológicas (por ejemplo Marshall *et al.*, 1996; Bernet *et al.*, 1997), objetivos que pueden tenerse en consideración por ejemplo a la hora de fijar caudales ecológicos en tramos regulados (OPHCHE, 1999).

También existen antecedentes de regionalizaciones expresamente enfocadas a la determinación de caudales ecológicos, o que se pueden utilizar para su determinación. Gordon *et al.* (1992), Stewardson y Gippel (1997; citado por Tharme, 2002) y Smakhtin (2001) hacen una revisión de muchas de las metodologías hidrológicas y de regionalización utilizadas para obtener parámetros relacionados con los caudales de estiaje.

Así, Nathan y McMahon (1992) desarrollaron una metodología para estimar características de caudales de estiaje en cuencas no instrumentadas en el sureste de Australia. Para ello, primero realizaron una identificación de ocho regiones homogéneas basada en análisis de tipo cluster, regresión múltiple y representación gráfica de datos multidimensionales aplicados a una serie de variables que potencialmente pueden ser relevantes en la predicción de caudales de estiaje (caudal medio anual y su desviación estandard, curvas de caudales clasificados, índice de caudal base, etc.). Finalmente, desarrollaron una ecuación de predicción de estas características de caudales de estiaje para cada región homogénea en función de las características de la cuenca.

Bérubé *et al.* (2002) desarrollaron en Québec (Canadá) una metodología para la determinación de lo que llaman caudales de conservación basada en una previa regionalización. Partieron de una zonificación de los ríos de Québec, donde en base a

una selección de 17 especies objetivo de peces así como de sus fases críticas de desarrollo y sus preferencias de hábitat se distinguieron 10 regiones ecológicas con objetivos de protección específicos. Para la determinación de los caudales de conservación en cada caso (especie objetivo y época del año según su fase de desarrollo) se utilizaron 4 métodos hidrológicos como los mejor se adaptados a las condiciones de Québec. Posteriormente realizaron una regionalización hidrológica aplicando un análisis de clusters a los valores de tres variables (caudal medio, mínimo y máximo anual) para las estaciones de aforo seleccionadas en el área de estudio, obteniéndose un total de 11 grupos de estaciones homogéneos. La superposición de las regiones ecológicas e hidrológicas dio como resultado un total de 15 regiones finales ecohidrológicas, en cada una de las cuales se propuso la determinación de los valores del caudal de conservación en lugares no instrumentados a través de un análisis de regresión múltiple en base a una serie de parámetros geográficos. En general, se vio que el área de la cuenca vertiente era el parámetro más determinante del caudal de conservación.

En la Península Ibérica también se encuentran trabajos donde se realizan regionalizaciones previas a la determinación de caudales ecológicos en grandes cuencas. Así, Baeza (2002) a partir de unos parámetros hidrológicos de interés ecológico, entre los que se incluyen parámetros característicos de aguas altas, aguas bajas, y variabilidad intra e interanual, dividió la Cuenca Hidrográfica del Tajo en zonas homogéneas. En dichas zonas se desarrollaron relaciones entre características de cuenca con valores de caudales ecológicos calculados a través de una propuesta de metodología hidrológica, el Q25d (valor medio para el periodo considerado de la media de caudales diarios durante 25 días consecutivos mínima para cada año).

Por su parte, Alves *et al.* (2002) dividieron el territorio portugués en zonas con patrones de regímenes hidrológicos homogéneos a partir de técnicas multivariantes aplicadas a parámetros de variabilidad de caudales, características de avenidas y caudales de estiaje así como su periodicidad. En cada región se propusieron métodos simples para la determinación de caudales ecológicos (a partir de la curva de caudales clasificados y de los caudales medios mensuales), estableciéndose ecuaciones a partir de descriptores de cuenca para calcular las variables hidrográficas en puntos donde no se tuvieran registros de caudales históricos.

Todos estos estudios ponen de manifiesto la necesidad de realizar una regionalización en zonas homogéneas previa a la propuesta de determinación de caudales de mantenimiento, con el fin de facilitar la transferencia de resultados desde puntos donde se tienen registros a otros donde no se dispone de los mismos (Andrade, 1999).

#### **1.4 OBJETIVOS**

El presente trabajo de investigación pretende avanzar en el conocimiento de dos de los principales problemas que rodean el concepto y determinación de los caudales ecológicos a través del análisis del método del Caudal Básico. En primer lugar, se trata de comprobar si dicha metodología puede llegar a ser de general aceptación, para lo cual debe verificar el cumplimiento de las siguientes premisas:

- Ser **objetiva**, de forma que no de lugar a distintas interpretaciones y/o resultados a partir de los mismos datos iniciales.
- Ser **sencilla** en el proceso de cálculo y **rápida** en la obtención de resultados, sin la necesidad de análisis de datos o trabajos de campo complicados ni prolongados en el tiempo.
- Ser **sistemática**, de forma que los resultados sean reproducibles (distintos equipos obtengan los mismos resultados al aplicar la metodología) y comparables de unos ríos o tramos de río a otros.
- Ser **específica** para cada río y/o tramo de río, recogiendo sus características particulares. Este aspecto queda justificado en el texto refundido de la Ley de Aguas (2001) donde se establece la necesidad de realizar estudios específicos para cada tramo de río para el establecimiento de caudales ecológicos (Cachón, 2003).
- Ser **universal**, válida para cualquier río o situación.
- Tener **fundamento científico**, donde las decisiones tomadas y los criterios establecidos están basados en el conocimiento y características del medio y no responden a valores arbitrarios.
- Dar **resultados contrastados** tanto en los valores obtenidos respecto a otras metodologías, como respecto a los requerimientos de los diferentes elementos ambientales mediante experimentación.

Estos aspectos quedan recogidos en el siguiente objetivo general:

**1. Análisis del método del Caudal Básico, evaluando los principales aspectos del mismo, de forma que lo justifique como un método de general aceptación para la determinación de caudales ecológicos cumpliendo con las premisas establecidas anteriormente.**

Para conseguir dicho objetivo general se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar y ajustar las distintas fases de la metodología, justificando los procesos de cálculo y decisiones a tomar.
- Desarrollar algunos aspectos de la metodología que pudieran quedar incompletos.
- Evaluar los valores de caudales obtenidos mediante esta metodología desde un punto de vista hidrológico, hidráulico y biológico.

En segundo lugar, se busca la aplicación de esta metodología de una forma extensiva a la Cuenca Hidrográfica del Ebro, incluyendo situaciones donde no se tengan estaciones de aforo ni otro tipo de datos de campo. Deberán analizarse las variables que juegan un papel relevante en la predicción del Caudal Básico. Para ello, será necesario primero estudiar una posible regionalización en zonas homogéneas, debido a la gran variabilidad geomorfológica, climática y, por lo tanto, de regímenes hidrológicos existente en la cuenca (por ejemplo ICONA, 1987; Barrera, 1999; Vázquez, 2004).

De esta forma se formulan los siguientes objetivos generales a alcanzar en el presente trabajo:

**2. Regionalización de la Cuenca del Ebro para la aplicación del método del Caudal Básico en la determinación de caudales de mantenimiento.**

Para conseguir dicho objetivo general se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Identificar las principales variables relacionadas con el Caudal Básico.
- Caracterizar los ríos de la Cuenca del Ebro en base a estas variables.
- Establecer regiones homogéneas en función de las variables seleccionadas.
- Obtener una relación entre las variables seleccionadas y el Caudal Básico, dentro de cada región homogénea, para su posterior determinación sin la necesidad de recurrir a las bases de cálculo de forma que se resuelvan los problemas de cálculo en cuencas sin aforar.

Por último, y ligado con el objetivo anterior, se pretende examinar algunos modelos y/o herramientas que han dado buenos resultados en la predicción y modelización de variables, para ver su posible validez en la estimación del Caudal Básico. Para ello se formula un tercer objetivo general de la siguiente forma:

**3. Estudiar la aplicabilidad de nuevas tecnologías, en concreto las redes neuronales artificiales (RNA), a la determinación de caudales de mantenimiento.**

## **Bibliografía**

ACREMAN, M. & M.J. DUNBAR. 2004. Defining environmental river flow requirements – a review. *Hydrology and Earth System Sciences* 8(5): 861-876.

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. 2005. *Pla Sectorial de Cabals de Manteniment de les conques internes de Catalunya*. Departament de Medi Ambient i Habitatge, Generalitat de Catalunya.

ADDLEY, R.C. & T.B. HARDY. 2002. A decade of 2-dimensional instream flow modelling experience: Part 1 and 2– benefits and pitfalls of data collection and hydrodynamic modelling. In: *Proceedings of Environmental Flows for River Systems. An International Conference on Assessment and Implementation*. 3-8 march 2002. Cape Town, South Africa.

ALMAGRO, F., A. LAGUNA, J.L. CANGA, L. ORTEGA & M. CEBRIAN. 2003. Régimen ambiental de caudales en la cuenca del Segura. Ponencia en el curso: *Régimen ambiental de caudales*. Universidad Internacional Menéndez y Pelayo. Cuenca, 29 de septiembre al 3 de octubre de 2003.

ALVES, M.H. & HENRIQUES, A.G. 1994. Instream flow determination for mitigating environmental impact on fluvial systems downstream dam and reservoirs. p 351-358. In: Tsakiris, G. and Santos, M.A. (eds). *Advances in water resources and management*. A.A. Balkema, Rotterdam.

ALVES, M.H., J.M. BERNARDO, P.G. MATIAS & L. RIBEIRO. 2002. Regionalization and environmental flows in the Portuguese Water plan (1): general approach and environmental flow assessment. In: *Proceedings of Environmental Flows for River Systems. An International Conference on Assessment and Implementation*. 3-8 march 2002. Cape Town, South Africa.

ANDRADE, E.M. 1999. Regionalization of small watersheds in arid and semiarid regions: cluster and Andrews' curve approaches. *Eng. Agric., Jaboticabal* 18(4): 39-52.

ARTHINGTON, A.H. 1998. *Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: review of holistic methodologies*. Land and Water Resources Research and Development Corporation Occasional Paper No. 26/98. Canberra, Australia. 46 pp.

ARTHINGTON, A.H., S.O. BRIZGA & M.J. KENNARD. 1998. *Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: Best practice framework*. Land and Water Resources Research and Development Corporation Occasional Paper No. 25/98. Canberra, Australia. 26 pp.

ASCE TASK COMMITTEE ON APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN HYDROLOGY. 2000. Artificial neural networks in Hydrology II: Hydrologic applications. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE* 5(2): 124-137.

ATZBERGER, C. 2004. Object-based retrieval of biophysical canopy variables using artificial neural networks and radiative transfer models. *Remote Sens. Environ.* 93: 53-67.



- BAEZA, D. 2002. *Caracterización del régimen ecológico de caudales en los ríos de la Cuenca del Tajo, basado en su regionalización hidrobiológica*. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, UPM. Madrid. 234 pp.
- BAIN, M.B., J.T.FINN & H.E. BOOKE. 1988. Streamflow regulation and fish community structure. *Ecology* 69(2): 382-392.
- BAILEY, R.G. 1989. *Ecoregions of the continents*. U.S. Department of Agricultura, Forest Service. Washington D.C.
- BARRERA, M. 1999. *Las aguas del Ebro*. ACESA. Zaragoza. 586 pp.
- BELAUD, A., P. CHAVEROCHE, P. LIM & C. SABATON. 1989. Probability-of-use curves applied to brown trout (*Salmo trutta fario* L.) in rivers of southern France. *Regulated Rivers: Research & Management* 3: 321-336.
- BERNET, J.A., J.M. EILERS, T.J. SULLIVAN, K.E. FREEMARK & C. RIBIC. 1997. A quantitative method for delineating regions: an example for the western Corn Belt plains ecoregion of the USA. *Environmental management* 21(3): 405-420.
- BÉRUBÉ, P., M. LECLERC & L. BELZILE. 2002. Presentation of an ecohydrological method for determining the conservation flow for fish habitats in Québec's rivers (Canada). In: *Proceedings of Environmental Flows for River Systems. An International Conference on Assessment and Implementation*. 3-8 march 2002. Cape Town, South Africa.
- BIETZ, F.B.; MARTIN, J.A.; & ENGLERT, J. 1985. *Instream Flow Needs for Fish in Alberta: a Users Guide to Assessment Methods*. Alberta Energy and Natural Resources, Fish and Wildlife Division, Edmonton, Alberta.
- BINS, N.A. & EISERMAN, F.M. 1979. Quantification of fluvial trout habitat in Wyoming. *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 108: 215-228.
- BIRD, D.J. 1996. Problems with the use of IFIM for salmonids and guidelines for future UK studies. In: *Proc. 2<sup>nd</sup> International Symposium on Habitat Hydraulics. Ecohydraulics 2000*. Vol A: 407-418. Quebec (Can).
- BOURGEOIS, G.; CAISSIE, D.; & EL-JABI, N. 1996. Sensitivity analysis of PHABSIM in a small Atlantic Salmon stream. In: *Proc. 2<sup>nd</sup> International Symposium on Habitat Hydraulics. Ecohydraulics 2000*. Vol B: 381-394. Quebec (Can).
- BOVEE, K.D. 1978. *Probability of use criteria for the Family Salmonidae*. Instream Flow Information Paper No. 4. USDI Fish and Wildlife Service. FWS/OBS 78/07. 80 pp.
- BOVEE, K.D. 1982. *A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*. Instream Flow Information Paper 12. U.S.D.I. Fish Wildl. Serv., Office of Biol. Serv. FWS/OBS-82/26. 248 pp.

BOVEE, K.D.; LAMB, B.L.; BARTHOLOW, J.M.; STALNAKER, C.B.; TAYLOR, J.; & HENRIKSEN, J. 1998. *Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*. U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report USGS/BRD-1998-0004. Viii + 131 pp.

BOWDEN G.J., G.C. DANDY & H.R. MAIER. 2005. Input determination for neural network models in water resources applications. Part 1- background and methodology. *Journal of Hydrology* 301: 75-92.

BOWLBY, J.N. & ROFF, J.C. 1986. Trout biomass and habitat relationships in Southern Ontario streams. *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 115: 503-514.

BOX, G.; G.M. JENKINS & G. REINSEL. 1994. *Time series analysis: Forecasting & control*. 3<sup>rd</sup> edition. Prentice Hall. 592 pp.

BRIDLE, J.S. 1990. Probabilistic interpretation of Feedforward Classification Network Outputs, with Relationship to Statistical pattern Recognition. *Neurocomputing*, Vol. F68. NATO ASI Series.

BRIZGA, S.O. 1998. Methods addressing flow requirements for geomorphological purposes. Pp. 8-46. In: Arthington AH & JM Zalucki (eds). *Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: review of methods*. Land and Water Resources Research and Development Corporation Occasional Paper No. 27/98. Canberra, Australia. 141 pp.

CACHÓN, J. 2003. Régimen ambiental de caudales. Puesta en práctica en España: problemas, requerimientos y propuesta de soluciones. Ponencia en el curso: *Régimen ambiental de caudales*. Universidad Internacional Menéndez y Pelayo. Cuenca, 29 de septiembre al 3 de octubre de 2003.

CAMARGO, J.A. & D. GARCÍA DE JALÓN. 1990. The downstream impacts of the Burgomillodo Reservoir, Spain. *Regulated Rivers: Res. & Manag.* 5: 305-317.

CASTELLANO-MÉNDEZ M., W. GONZÁLEZ-MANTEIGA, M. FEBRERO-BANDE, J.M. PRADA-SÁNCHEZ & R. LOZANO-CALDERÓN. 2004. Modelling of the monthly and daily behaviour of the runoff of the Xallas river using Box-Jenkins and neural networks methods. *Journal of Hydrology* 296:38-58.

CHAVEROCHE, P. & C. SABATON. 1989. An analysis of brown trout (*Salmo trutta fario*) habitat: the role of qualitative data from expert advice in formulating probability-of-use curves. *Regulated Rivers: Research & Management* 3: 305-319.

CHOW, V.T. 1985. *Hidráulica de los canales abiertos*. Ed. Diana. México D.F. 633 pp.

COLLINGS, M.R. 1972. A methodology for determining instream flow requirements for fish. In: *Proceedings, Instream Flow Metrology Workshop*. Washington State Water Program, Olympia. Pp. 72-86.

COLWELL, R.K. 1974. Predictability, constancy, and contingency of periodic phenomena. *Ecology* 55: 1148-1153.

CRAWFORD, N.A. & R.K. LINSLEY. 1966. *Digital simulation in hydrology: the Stanford Watershed Simulation Model IV*. Technical Report n. 39. Department of Civil Engineering, Stanford University. Stanford, California.

CRISP D.T. 1989. Some impacts of human activities on trout, *Salmo trutta*, populations. *Freshwater Biology* 21: 21-33.

CUPLIN, P. & VAN HAVEREN, B. 1979. *Instream Flow Guidelines*. U.S. Bureau of Land Management, Washington D.C.

CUSHMAN, R.M. 1985. Review of ecological effects of rapidly varying flows downstream from hydroelectric facilities. *North American Journal of Fisheries Management* 5: 330-339.

DIEZ HENÁNDEZ, J.M. 2004. *Análisis comparativo de los métodos actuales de simulación hidráulica en PHABSIM-IFIM y su influencia en la evaluación del hábitat fluvial*. Tesis doctoral. Dep. de Ingeniería Agrícola y Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid.

DOCAMPO, L. & G. DE BIKUÑA, B. 1995. The Basque Method for determine instream flows in Northern Spain. *Rivers*, 4(4): 292-311.

DOCAMPO, L. 1999. Modelización hidráulica de caudales ecológicos. *Ingeniería Civil*, 113: 43-55.

ESTES, C.C. 1996. Annual summary of instream flow reservations and protection in Alaska. Alaska Department of Fish and Game. *Fisheries Data Series No. 96-45*. Anchorage, Alaska. 106 pp.

FAHLMAN S.E. & C. LEBIERE. 1988. *The Cascade-Correlation Learning Architecture*. *Advances in Neural Information Processing Systems 2*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, USA.

GAN, K.C. & McMAHON, T.A. 1990. Variability of results from the use of PHABSIM in estimating habitat area. *Regulated Rivers: research & management* 5: 233-239.

GARCIA DE BIKUÑA, B. 2003. Régimen ambiental de caudales en el País Vasco: la DMA como punto de referencia. Ponencia en el curso: *Régimen ambiental de caudales*. Universidad Internacional Menéndez y Pelayo. Cuenca, 29 de septiembre al 3 de octubre de 2003.

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

GARCIA DE JALON, D. 1992. Impacto Ambiental de las minicentrales hidroeléctricas. *Quercus*, 80: 38-42.

- GARCIA DE JALON, D. & SCHMIDT, G. 1998. *Manual práctico sobre minicentrales hidroeléctricas*. AEMS ríos con vida. 87 pp.
- GEER, W.H. 1980. *Evaluation of five instream needs methodologies and water quantity needs of three Utah trout streams*. U.S. Fish and Wildlife Service, Ft. Collins, CO. Publication W/IFG-80/W91.
- GHANEM, A. & HICKS, F. 1992. *A review of the hydraulic models used in instream flow needs. Assessment methods*. Water Resources Engineering Report No. 92-4. Department of Civil Engineering, University of Alberta. Edmonton, Alberta. 64 pp.
- GHANEM, A., STEFFLER, P., HICKS, F. and KATOPODIS, C. 1996. Two-dimensional hydraulic simulation of physical habitat conditions in flowing streams. *Regulated Rivers: Research & Management* 12: 185-200.
- GIPPEL, C. & STEWARDSON, M. 1996. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows. In: *Proc. 2<sup>nd</sup> International Symposium on Habitat Hydraulics. Ecohydraulics 2000*. Vol A: 571-582. Quebec (Can).
- GONZALEZ DEL TANAGO, M. & GARCIA DE JALON, D. 1995. *Restauración de ríos y riberas*. Fundación Conde del Valle de Salazar. ETSIM, Madrid. 319 pp.
- GORDON, N.D.; MCMAHON, T.A.; & FINLAYSON, B.L. 1992. *Stream hydrology. An introduction for ecologists*. John Wiley & Sons, Chichester. 526 pp.
- GORE, J.A. & G.E. PETTS (eds.). 1989. *Alternatives in Regulated River Management*. CRC Press Inc. Boca Raton, Florida. 343 pp.
- GROWNS, J. & N. MARSH. 2000. *Characterisation of Flows in Regulated and Unregulated Streams in Eastern Australia*. Technical Report 3/2000. CRC for Freshwater Ecology, Canberra.
- HAESTAD METHODS. 1997. *Computer applications in hydraulic engineering*. Haestad Press. Waterbury, CT (USA). 166 pp.
- HARDY, T.B. 1998. The future of habitat modelling and instream flow assessment techniques. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* 14: 405-420.
- HEGGENES, J. 1988. Effects of Short-Term Flow Fluctuations on Displacement of, and Habitat Used by, Brown Trout in a Small Stream. *Trans. Amer. Fish. Soc.* 117: 336-344.
- HILERA, J.R. & MARTÍNEZ, V.J. 1995. *Redes neuronales Artificiales. Fundamentos, modelos y aplicaciones*. RA-MA Editorial. Madrid. 390 pp.
- HOBART PERRY, C., R.C. MILLER, A.R. KASTER & K.N. BROOKS. 2000. Watershed Management Implications of Agroforestry Expansion on Minnesota's Farmlands. *USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-13*. 339-342 pp.

- HOEL, P.G. & JESSEN, R.J. 1977. *Estadística básica para negocios y economía*. Compañía Editorial Continental, S.A. México. 452 pp.
- HOGAN, D.L. & CHURCH, M. 1989. Hydraulic geometry in small coastal streams: progress toward quantification of salmonid habitat. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46: 844-852.
- HOPPE, R.A. 1975. *Minimum Streamflows for Fish*. Soils-Hydrology Workshop, U.S. Forest Service, Montana State University, Bozeman.
- HUANG, S.L. & J.J. FERNG. 1990. Applied Land Classification for Surface Water Quality Management: I. Watershed Classification. *Journal of Environmental management* 31: 107-126.
- HUGHES, D.A.; O'KEEFFE, J.H.; SMAKHTIN, V.; & KING, J.M. 1997. Development of an operating rule model to simulate time series of reservoir releases for instream flow requirements. *Water SA* 23 (1): 21-30.
- HUGHES, D.A. & ZJERVOLGEL, G. 1998. The inclusion of operating rules in a daily reservoir simulation model to determine ecological reserve releases for river maintenance. *Water SA* 24 (4): 293-302.
- HUGHES, D.A. 1999. Towards the incorporation of magnitude-frequency concepts into the building block methodology used for quantifying ecological flow requirements of South African rivers. *Water SA* 25 (3): 279-284.
- HSU, K.L., H.V. GUPTA, & S. SOROOSHIAN. 1995. Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process. *Water Resources Research*, 31 (10), 2517-2530.
- HYDROLOGIC RESEARCH LABORATORY. 1972. *National Weather Service River Forecast System: forecast procedures*. NOAA Technical memorandum NWSHY-DRO14, National Weather Service, National oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, Washington D.C.
- ICONA. 1987. *Mapa de estados erosivos. Cuenca Hidrográfica del Ebro*. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 87 pp.
- IRVINE, J.R. 1984. *Effects of varying discharge on stream invertebrates and underyearling salmon and trout*. Ph.D. Thesis, Zoology Department, University of Otago, Dunedin, New Zealand. 254 pp.
- JORDE, K. 1996. Ecological evaluation of instream flow regulations based on temporal and spatial variability of bottom shear stress and hydraulic habitat quality. In: Leclerc, M., Capra, H., Valentin, S., Boudreault, A. and Coté, Y. (eds). *Ecohydraulics 2000. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Habitat Hydraulics*. Québec, June 1996. Volume B. INRS-Eau, Québec.

JOWETT, I.G. 1989. *River hydraulic and habitat simulation, RHYHABSIM computer manual*. New Zealand Ministry of Agriculture and Fisheries, Fisheries Miscellaneous Report 49. Christchurch. 39 pp.

JOWETT, I.G. 1997. Instream flow methods: a comparison of approaches. *Regulated Rivers: Research & Management*, vol. 13: 115-127.

KING, J.M. & LOUW, M.D. 1998. Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology. *Aquatic Ecosystem Health and Management*. 1: 109- 124.

KING, J.M.; THARME, R.E.; & BROWN, C.A. 1999. *Definition and implementation of instream flows*. World Commission on Dams. Southern Waters Ecological Research and Consulting. Freshwater Research Unit. University of Cape Town. Informe inédito.

KING, J.M.; R.E. THARME & M.S. DE VILLIERS (Ed.). 2000. *Environmental Flow Assessments for Rivers: Manual for the Building Block Methodology*. WRC Report No: TT 131/00. Freshwater Research Unit. University of Cape Town. 340 pp.

KOZA, J.R. 1993. *Genetic Programming*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.

KREBS, C.J. 1986. *Ecología*. Ediciones Pirámide S.A. Madrid. 782 pp.

LACEY, G.C. & R.B. GRAYSON. 1997. Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia. *Journal of Hydrology* 204: 231-250.

LOAR, J.M. 1985. *Application of Habitat Evaluation Models in Southern Appalachian Trout Streams*. Publ. 2383. Environmental Sci. Div., Oak Ridge Matinal Lab. Oak Ridge, Tennessee.

LÓPEZ CADENAS, F. & M. BLANCO. 1976. *Hidrología Forestal. 1ª Parte*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, U.P.M. Madrid. 387 pp.

MAIER, H.R. & G.C. DANDY. 1996. The use of artificial neural networks for the prediction of water quality parameters. *Water resources Research* 32(4): 1013-1022.

MARGALEF, R. 1977. *Ecología*. Ed. Omega. Barcelona. 951 pp.

MARGALEF, R. 1983. *Limnología*. Ed. Omega. Barcelona. 1010 pp.

MARGALEF, R. 1991. *Teoría de los Sistemas Ecológicos*. Publicacions de la Universitat de Barcelona. 291 pp.

MARSHALL, I.B., C.A.S. SMITH & C.J. SELVY. 1996. A national framework for monitoring and reporting on environmental sustainability in Canada. *Environmental Monitoring and Assessment* 39: 25-38.

MARTIN VIDE, J. (ed.). 1997. *Avances en climatología histórica en España / Advances in historical climatology in Spain*. Barcelona, Oikos-tau. 223 pp.

MARTÍNEZ SANTA-MARIA, C. 2003. Régimen ambiental de caudales en el tramo inmediato aguas abajo del embalse de “El Vado” (Guadalajara). Ponencia en el curso: *Régimen ambiental de caudales*. Universidad Internacional Menéndez y Pelayo. Cuenca, 29 de septiembre al 3 de octubre de 2003.

MARTÍNEZ SANTA-MARIA, C. & FERNÁNDEZ YUSTE, A. 2006. Índices de alteración hidrológica en ecosistemas fluviales. CEDEX. Madrid.

MATHUR, D.; BASON, W.H.; PURDY, E.J.; & SILVER, C.A. 1984. A critique of the Instream Flow Incremental Methodology. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 42:825-830.

MCCOSTER, R.. 1998. Methods assessing the flow requirements of wetland, riparian and floodplain vegetation. Pp. 47-65. In: Arthington AH & JM Zalucki (eds). *Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: review of methods*. Land and Water Resources Research and Development Corporation Occasional Paper No. 27/98. Canberra, Australia. 141 pp.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (M.M.A.). 1998. *El Libro Blanco del Agua en España*. Madrid. 855 pp.

MINNS A.W. & M.J. HALL. 1996. Artificial neural networks as rainfall-runoff models. *Hydrological Sciences Journal* 41(3): 399-417.

MORADKHANI H., K.-L. HSU, H.V. GUPTA, & S. SOROOSHIAN. 2004. Improved streamflow forecasting using self-organizing radial basis function artificial neural networks. *Journal of Hydrology* 295: 246-262.

MORHARDT, J.E. 1986. *Instream Flow Methodologies*. Electric Power Research institute, Palo Alto, Ca. Research Project 2194-2.

MORHARDT, J.E & MESICK, C.F. 1988. Behavioral carrying capacity as a possible short term response variable. *Hydro Review* 7(2): 32-40.

NATHAN, R.J. & T.A. MCMAHON. 1992. Estimating low flow characteristics in ungauged catchments. *Water Resources Management* 6(2): 85-100.

NELSON, F.A. 1984. *Guidelines for Using the Wetted Perimeter (WETP) Computer program*. Montana Department of Fish, Wildlife and Parks, Bozeman, Montana.

NELSON, R.F., D.S. KIMES, W.A. SALAS & M. ROUTHIER. 2000. Secondary forest age and tropical forest biomass estimation using thematic mapper imagery. *BioScience* 50: 419-431.

NEURALWARE 2000. *NeuralSIM, the Complete Solution for neural Data Modelling. User Guide*. NeuralWare, Pittsburgh, PA, USA.

OFICINA DE PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO (OPHCHE). 1999. *Delimitación de regiones ecológicas en la Cuenca del Ebro* [en línea]. Universitat de Barcelona, Departament d'Ecologia.

[Consultat: 07-03-2003]. Disponible en Internet: <http://oph.chebro.es/DOCUMENTACION/EstudiosEcologicos/1998-Ph-08-I/index.htm>

OLMEDA, I. & S. BARBA-ROMERO (editores). 1993. *Redes Neuronales Artificiales, Fundamentos y Aplicaciones*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares, Madrid. 220 pp.

ORTH, D.J. & LEONARD, P.M. 1990. Comparison of discharge methods and habitat optimization for recommending instream flows to protect fish habitat. *Regulated Rivers: Research & Management*, vol. 5: 129-138.

ORTH, D.J. & MAUGHAN, O.E. 1982. Evaluation of the Incremental Methodology for Recommending Instream Flow for Fishes. *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. III (4): 413-445.

O'SHEA, D.T. 1995. Estimating minimum instream flow requirements for Minnesota streams from hydrologic data and watershed characteristics. *North American Journal of Fisheries Management* 15: 569-578.

PALAU, A. 1993. *Proposta per l'establiment de cabals de manteniment en aprofitaments hidràulics de l'àmbit hidrogràfic de Catalunya*. Dep. Medi Ambient. Generalitat de Catalunya. Inédito.

PALAU, A. 1994. Los mal llamados caudales "ecológicos". Bases para una propuesta de cálculo. *OP (Obras Públicas)*, 28(2): 84-95.

PALAU, A. y J. ALCÁZAR. 1996. The basic flow: an alternative approach to calculate minimum environmental instream flows. In: *Proc. 2<sup>nd</sup> International Symposium on Habitat Hydraulics. Ecohydraulics 2000*. Vol A: 547-558. Quebec (Can).

PALAU, A., J. ALCÁZAR, C. ALCÁCER & J. ROI. 1997. *El Caudal Básico. Método para la Gestión Hidrobiológica de Ríos Regulados*. Informe técnico para el CEDEX. Ministerio de Medio Ambiente. 109 pp.

PALAU, A. & J. ALCÁZAR. 1999. Las variaciones de caudal en la gestión de ríos regulados. Establecimiento de una tasa de cambio por unidad de tiempo en el tramo del río Genil aguas bajo de la presa de Iznájar (Córdoba). En: *I Congreso sobre Caudales Ecológicos*. Terrassa, 30 de septiembre al 2 de octubre de 1999. 111-121 pp.

PALAU, A. 2003. Régimen ambiental de caudales: estado del arte. Ponencia en el curso: *Régimen ambiental de caudales*. Universidad Internacional Menéndez y Pelayo. Cuenca, 29 de septiembre al 3 de octubre de 2003.

PALMER, C., N. ROSSOUW, P. SCHERMAN & N. MULLER. 2002. The development of methods to integrate water quality into riverine environmental flow assessment. In: *Proceedings of Environmental Flows for River Systems. An International Conference on Assessment and Implementation*. 3-8 march 2002. Cape Town, South Africa.



PANKRATZ, A. 1983. *Forecasting with univariate box-jenkins models: concepts and cases*. Wiley series in probability and mathematical statistics, ISSN 0271-6356. John Wiley & Sons, Inc. 576 pp.

PEÑA SÁNCHEZ DE RIVERA, D. 1993. *Estadística, modelos y métodos. I – Fundamentos*. Alianza editorial, Madrid. 571 pp.

PERRIN C., V. ANDRÉASSIAN & C. MICHEL. 2002. *Precipitation-runoff modeling*. HarmoniQuA – State-of-the-art Report on QA Guidelines, October 2002. Cemagref, France. 10 pp.

PLATTS, W.S., C. ARMOUR, G.D. BOOTH, M. BRYANT, J.L. BUFFORD, C. CULPIN, S. JENSEN, G.W. LIENKAEMPER, G.W. MINSHALL, S.B. MONSEN, R.L. NELSON, J.R. SEDELL & J.S. TUHY. 1987. *Methods for evaluating riparian habitats with applications to management*. General Technical Report INT-221. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, Ogden, UT. 177 pp.

POLLARD, S. 2000. Social use of riverine resources. Chpt 9: 95-116. In: King JM, RE Tharme & MS De Villiers (eds). *Environmental flow assessments for rivers: manual for the Building Block Methodology*. Water Research Commission Technology Transfer report No. TT131/100. Water Research Commission, Pretoria. 340 pp.

POLLARD, S. 2002. Setting our sites on the right scale: a comparison of IFIM and a new approach, the Geomorphological-biotope Assessment (GBA), in the Marite river. In: *Proceedings of Environmental Flows for River Systems. An International Conference on Assessment and Implementation*. 3-8 march 2002. Cape Town, South Africa.

PRAT, N. 1995. Los aspectos medioambientales en los Planes Hidrológicos. In: *El Agua en Catalunya*. (Berga, L. ed.), ETSECCP-UPC (Barcelona) pp. 359-376.

PUCKRIDGE, J.T., F. SHELDON, K.F.WALKER & A.J. BOULTON. 1998. Flow variability and the ecology of large rivers. *Marine and Freshwater research* **49**: 55-72.

RANDOLPH, C.L. & WHITE, R.G. 1984. *Validity of the Wetted Perimeter Method for Recommending Instream Flows for Salmonids in Small Streams*. Montana Water Resources Research Center, Bozeman.

REISER, D.W., WESCHE, T.A. and ESTES, C. 1989. Status of instream flow legislation and practice in North America. *Fisheries* **14**(2): 22-29.

RENSCHLER, C.S., T. COCHRANE, J. HARBOR & B. DIEKKRÜGER. 2001. Regionalization methods for watershed management – Hydrology and soil erosion from point to regional scales. Pp. 1062-1067. In: D.E. Stott, r.h. Mohtar and G.C. Steinhardt (eds.) *Sustaining the Global Farm. Selected papers from the 10<sup>th</sup> international Soil Conservation Organization Meeting held May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory*.

- RICHARDS, K.S. 1982. *Rivers, Form and process in Alluvial Channels*. Methuen. London. 358 pp.
- RICHTER, B.D., BAUMGARTNER, J.V., POWELL, J. and BRAUN, D.P. 1996. A method for assessing hydrological alteration within ecosystems. *Conservation Biology* 10(4): 1163-1174.
- RICHTER, B.D., BAUMGARTNER, J.V., WIGINGTON, R. and BRAUN, D.P. 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biology* 37: 231-249.
- RIMMER, D.M. 1985. Effects of Reduce Discharge on Production and Distribution of Age-0 Rainbow Trout in Seminatural Channels. *Trans. Amer. Fish. Soc.* 114: 388-396.
- RÍOS, S. 1985. *Métodos estadísticos*. Segunda edición. Ediciones del Castillo, S.A. Madrid. 463 pp.
- ROWENTREE, K. & WADESON, R. 1998. A geomorphological framework for the assessment of instream flow requirements. *Aquatic Ecosystem Health and Management*. 1: 125- 141.
- SABATON, C., S. VALENTIN & Y. SOUCHON. 1995. *La Méthode des Microhabitats. Protocoles d'application*. CEMAGREF-EDF. HE-31/95/10. Lyon.
- SANCHEZ, R. 2000. *El método del caudal básico. Análisis de criterios de cálculo y aplicación para la obtención de caudales ecológicos*. Proyecto Final de Carrera. E.T.S. Ingeniería Agraria. Universidad de lleida. 95 pp.
- SANCHEZ, E.N. & A.Y. ALANIS. 2006. *Redes neuronales. Conceptos fundamentales y aplicaciones a control automático*. PEARSON EDUCACIÓN, S.A. Madrid. 232 pp.
- SCHLEITER, I.M., D. BORCHARDT, R. WAGNER, T. DAPPER, K.D. SCHMIDT, H.H. SCHMIDT, & H. WERNER. 1999. Modelling water quality, bioindication and population dynamics in lotic ecosystems using neural networks. *Ecological Modelling* 120(2-3): 271-286.
- SCHNEIDER, L.T. & NESTLER, J.M. 1996. Using hydraulic and water quality modeling output for instream flow studies. In: *Proc. 2<sup>nd</sup> International Symposium on Habitat Hydraulics. Ecohydraulics 2000*. Vol B: 275-282. Quebec (Can).
- SERRET, J. 1998. *Procedimientos estadísticos con STATGRAPHICS*. ESIC editorial. Madrid.
- SMAKHTIN, V.U. 2001. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology* 240. 147-186.
- SOSTOA, A., J. NADAL, F. CASALS, E. APARICIO, M.J. VARGAS, J.M. OLMO, M.A. PUIG & J. MALO. 1995. *Caudales ecológicos*. Proyecto PIE 121043 FECSA-UNESA. Documento inédito. Barcelona.

STALNAKER, C.B. and ARNETTE, S.C. 1976. *Methodologies for the determination of stream resource flow requirements: an assessment*. U.S. Fish and Wildlife Services, Office of Biological Services Western Water Association. 199 pp.

STEWARTSON, M.J. & C. GIPPEL. 2002. Incorporating flow variability into environmental flow regimes using the flow events method. In: *Proceedings of Environmental Flows for River Systems. An International Conference on Assessment and Implementation*. 3-8 march 2002. Cape Town, South Africa.

SWIFT, C.H. 1976. *Estimates of Stream Discharges Preferred by Steelhead Trout for Spawning and Rearing in Western Washington*. USGS Open File Report 75-155. U.S. Geological Survey, Tacoma, WA.

TARBET, K.L. & HARDY, T.B. 1996. Evaluation of one-dimensional and two-dimensional hydraulic modeling in a natural river and implications in instream flow assessment methods. In: *Proc. 2<sup>nd</sup> International Symposium on Habitat Hydraulics. Ecohydraulics 2000*. Vol B: 395-406. Quebec (Can).

TENNANT, D.L. 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries* 1 (4): 6-10.

THARME, R.E. 2000. An overview of environmental flow methodologies, with particular reference to South Africa. Chpt 3: 15-40. In: King JM, RE Tharme & MS De Villiers (eds). *Environmental flow assessments for rivers: manual for the Building Block Methodology*. Water Research Commission Technology Transfer report No. TT131/100. Water Research Commission, Pretoria. 340 pp.

THARME, R.E. 2002. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. In: *Proceedings of Environmental Flows for River Systems. An International Conference on Assessment and Implementation*. 3-8 march 2002. Cape Town, South Africa.

TOKAR A.S. & P.A. JOHNSON. 1999. Rainfall-runoff modelling using artificial neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering* 4(3): 232-239.

UNESA. 1993. *Caudales ecológicos. Metodologías para su evaluación y estado actual de la legislación correspondiente*. Dirección de Combustibles Fósiles y Medio Ambiente. Departamento de Medio Ambiente. UNESA. 114 pp.

VALVERDE RAMÍREZ, M.C.; H. F. DE CAMPOS VELHO, & N.J. FERREIRA. 2005. Artificial neural network technique for rainfall forecasting applied to the Sao Paulo region. *Journal of Hydrology* 301: 146-162.

VAZQUEZ, L. 2004. Influencia atlántica en la variabilidad hidrológica de la cuenca del Ebro. Ponencia presentada en las *XXVIII Jornadas Científicas de la AME bajo el lema La Meteorología y el Clima Atlánticos*. Universidad de Extremadura, del 11 al 13 de febrero de 2004). Badajoz. Disponible en [www.ame-web.org/jornadas\\_badajoz.htm](http://www.ame-web.org/jornadas_badajoz.htm).

VEGA-GARCÍA C., B.S. LEE, P.M. WOODARD & S.J. TITUS. 1996. Applying neural network technology to human-caused wildfire occurrence prediction. *AI Applications* 10(3): 9-18.

VEGA GARCÍA C., P.M. WOODARD, S.J. TITUS, W.L. ADAMOWICZ & B.S. LEE. 1999. Dos modelos para la predicción de incendios forestales en Whitecourt Forest, Canada. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.* Vol. 8 (1): 5-23.

VIZMANOS, J.R. & ASENSIO, R.. 1976. *Curso y ejercicios de Bioestadística*. Centro de promoción reprográfica, Madrid. 336 pp.

WATSON, D.F., & G.M. PHILIP. A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. *Geoprocessing* 2:315-327. 1985.

WERBOS, P.J. 1994. *The Roots of Backpropagation: from Ordered Derivatives to Neural Networks and Political Forecasting*. John Wiley & Sons, Inc. 319 pp.

WHITE, R.J.; HANSEN, E.A.; & ALEXANDER, G.R. 1976. Relationship of trout abundance to stream flow in midwestern streams. *Proceedings of the Symposium and Specialty Conference on Instream Flow Needs*, American Fisheries Society, vol. II, pp 376-399.

ZUBOY, J.R. 1981. A new tool for fisheries managers: the Delphi technique. *North America Journal of Fisheries Management* 1:55-59.

## **Anexo 1.**

Listado de variables relacionadas con caudales de mantenimiento

**X1:** Módulo interanual. Media de los caudales diarios para todo el periodo considerado.

**X2:** Qmaxabs: caudal máximo absoluto para el periodo considerado.

**X3:** Qminabs: caudal mínimo absoluto para el periodo considerado.

**X4:** Qmax: Media de los caudales máximos diarios para cada año.

**X5:** Qmin: Media de los caudales mínimos diarios para cada año.

**X6:** Caudal específico medio (Qem). Es el caudal medio por unidad de área (módulo/superficie). Este parámetro se ha calculado para todo el periodo considerado en conjunto.

**X7:** Caudal específico máximo (Qemax). Es el caudal máximo por unidad de área, calculado para todo el periodo considerado en conjunto según la expresión:

$$Q_{emax} = \frac{Q \text{ máx abs}}{\text{superficie}}$$

**X8:** Caudal específico máximo (Qmemax). Es el caudal máximo por unidad de área, calculado para cada año y haciendo la media según la expresión:

$$Q_{memax} = \text{media} \left( \frac{Q_{max}}{\text{superficie}} \right)$$

**X9:** Predictibilidad (P). Parámetro basado en la teoría matemática de la información que describe lo predecible que son los regímenes de caudales, incluyendo la frecuencia e intensidad de caudales así como su distribución periódica dentro del régimen anual de caudales (Colwell, 1974). La predictibilidad es por tanto la suma de dos componentes diferentes, la constancia y la contingencia. Estos parámetros se han calculado con la ayuda del programa COLWELL en AQUAPAK (Gordon *et al.*, 1992).

**X10:** Constancia (C). Parámetro que mide el grado en que un estado permanece sin variaciones (en este caso, caudales más o menos constantes a lo largo del año y también entre los distintos años).

**X11:** Contingencia (Cg). Parámetro que mide las diferencias estacionales y su constancia a lo largo de los años.

**X12:** Coeficiente C/P. Esta relación nos da idea de la contribución de la constancia a la predictibilidad.

**X13:** Coeficiente Cg/P. Esta relación nos da idea de la contribución de la contingencia a la predictibilidad.

**X14:** Índice de caudal base (IQbase). Describe las condiciones medias de caudales bajos (caudal base) y se calcula para todo el periodo considerado mediante la siguiente expresión (Gordon *et al.*, 1992):

$$IQ_{base} = \left( \frac{\text{Caudal medio mensual mínimo}}{Q_m} \times 100 \right)$$

Un valor del índice próximo a 1 indica que los caudales permanecen bastante constantes durante todo el año, mientras que un valor de 0 indica que se trata de un río intermitente (Hamilton & Bergersen, 1984, citado por Gordon *et al.*, 1992).

**X15:** Índice de caudal base calculado para cada año (IQbasem) haciendo la media.

**X16:** Q90%/Q50%. Índice que describe la contribución del caudal base al régimen de caudales (Gordon *et al.*, 1992).

**X17:** Q<sub>b</sub>/Q<sub>m</sub>: Porcentaje que representa el Q<sub>b</sub> frente al caudal medio interanual.

**X18:** Q<sub>clasif</sub>: Caudal clasificado al que corresponde el Q<sub>b</sub>.

**X19:** %días<Q<sub>b</sub>: Porcentaje de días en que el caudal es inferior al Q<sub>b</sub>.

**X20:** Superficie de la cuenca en km<sup>2</sup>.

**X21:** Pendiente media de la cuenca, definida por la media ponderada de las pendientes de todas las superficies en las que la línea de máxima pendiente es constante.

**X22:** Altura media de la cuenca, definida por el cociente entre el volumen total del relieve de la cuenca y la superficie de ésta en proyección horizontal.

**X23:** Índice de compacidad de Gravelius. Es un índice de forma de la cuenca calculado a través de la siguiente expresión:

$$Kc = 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{S}}$$

donde  $P$  es el perímetro de la cuenca y  $S$  la superficie. El valor de este índice es mayor que la unidad (sería igual a 1 en cuencas perfectamente circulares) y crece con la irregularidad de la forma de la cuenca, aspecto que influye en la escorrentía superficial de la cuenca y en el tiempo de concentración, y por lo tanto en el régimen de caudales (López Cadenas & Blanco, 1976).

**X24:** Densidad de drenaje, calculado como la suma de las longitudes de los cauces dividida por la superficie de la cuenca.

**X25:** Capacidad máxima de humedad del suelo en mm (CMHS). Valor medio de la cuenca definida para cada estación de aforo obtenido como suma ponderada a partir del mapa de usos del suelo, tal y como se expone en el Libro Blanco del Agua en España (MMA, 1998) según la siguiente tabla:

Usos del suelo	Capacidad máxima de humedad del suelo (mm)
Superficies artificiales	40
Espacios con poca vegetación	100
Tierras de labor en seco	155
Tierras de labor en regadío	215
Praderas y pastizales naturales	150
Sistemas agrícolas heterogéneos	195
Cultivos permanentes	210
Vegetación arbustiva	135
Bosque mixto	220
Bosques de frondosas y coníferas	230
Zonas húmedas, superficies de agua y artificiales	300

**X26:** Capacidad máxima de infiltración en mm (CMI). Valor medio de la cuenca definida para cada estación de aforo obtenido como suma ponderada a partir del mapa de litología, tal y como se expone en el Libro Blanco del Agua en España (MMA, 1998) según la siguiente tabla:

Litología	Infiltración máxima (mm)
Material aluvial de origen indiferenciado	400
Calizas y dolomías	1000
Margas	85
Margas yesíferas	75
Yesos	64
Materiales arenosos	450
Materiales gravo-arenosos	500
Calcarenitas (Macigno)	250
Arcosas	150
Rañas	95
Granitos	65
Rocas metamórficas	20
Gneiss	55
Pizarras	40
Rocas volcánicas	275



**X27:** Coeficiente orográfico, definido por el producto de la altura media de la cuenca y la relación altura media de la cuenca/superficie proyección horizontal (López Cadenas & Blanco, 1976).

**X28:** Coeficiente entre la diferencia de cota en la cuenca y su superficie

**X29 a X40:** medias mensuales de caudales (octubre a septiembre)

**X41 a X52:** máximas mensuales de caudales (octubre a septiembre)

**X53:** Mes de caudal medio máximo (Mesmax), calculado como el mes en que se ha producido con mayor frecuencia esta circunstancia.

**X54:** Qmaxmen: Promedio para todos los años de caudales máximos mensuales.

**X55:** Qmenmax: Caudal medio mensual del mes máximo.

**X56:** Qmaxx: promedio para todos los años de los máximos de caudales medios mensuales.

**X57 a X68:** mínimas mensuales de caudales (octubre a septiembre)

**X69:** Mes de caudal medio mínimo (Mesmin), calculado como el mes en que se ha producido con mayor frecuencia esta circunstancia.

**X70:** Caudal medio de caudales mínimos mensuales (Qminmes), calculado como la media de los valores para cada año.

**X71:** Qmenmin: Caudal medio mensual del mes mínimo.

**X72:** Qminx: promedio para todos los años de los mínimos de caudales medios mensuales.

A continuación se definen una serie de variables descriptoras de los regímenes de caudales bajos, medios y altos (deducidos a partir de la curva de caudales clasificados), dada la variabilidad de regímenes hidrológicos encontrados en la cuenca del Ebro.

**X73:** Caudal igualado o superado durante el equivalente a 10 días al año (Q10), calculado para todo el periodo considerado en conjunto.

**X74:** Caudal igualado o superado durante el equivalente a 90 días al año (Q90), calculado para todo el periodo considerado en conjunto.

**X75:** Caudal igualado o superado durante el equivalente a 270 días al año (Q270), calculado para todo el periodo considerado en conjunto.

**X76:** Caudal igualado o superado durante el equivalente a 330 días al año (Q330), calculado para todo el periodo considerado en conjunto.

**X77:** Caudal igualado o superado durante el equivalente a 347 días al año (Q347), calculado para todo el periodo considerado en conjunto.

**X78:** Caudal igualado o superado durante el equivalente a 355 días al año (Q355), calculado para todo el periodo considerado en conjunto.

**X79:** Caudal igualado o superado el 5 % del tiempo (Q5%), calculado para todo el periodo considerado en conjunto.

**X80:** Caudal igualado o superado el 10 % del tiempo (Q10%), calculado para todo el periodo considerado en conjunto.

**X81:** Caudal igualado o superado el 25 % del tiempo (Q25%), calculado para todo el periodo considerado en conjunto.

**X82:** Caudal igualado o superado el 30 % del tiempo (Q30%), calculado para todo el periodo considerado en conjunto.

**X83:** Caudal igualado o superado el 50 % del tiempo (Q50%), calculado para todo el periodo considerado en conjunto.

**X84:** Caudal igualado o superado el 75 % del tiempo (Q75%), calculado para todo el periodo considerado en conjunto.

**X85:** Caudal igualado o superado el 95 % del tiempo (Q95%), calculado para todo el periodo considerado en conjunto.

**X86:** Caudal igualado o superado durante 10 días al año (Q10), calculado como la media de su valor para cada año.

**X87:** Caudal igualado o superado durante 90 días al año (Q90), calculado como la media de su valor para cada año.

**X88:** Caudal igualado o superado durante 270 días al año (Q270), calculado como la media de su valor para cada año.

**X89:** Caudal igualado o superado durante 330 días al año (Q330), calculado como la media de su valor para cada año.

**X90:** Caudal igualado o superado durante 347 días al año (Q347), calculado como la media de su valor para cada año.

**X91:** Caudal igualado o superado durante 355 días al año (Q355), calculado como la media de su valor para cada año.

**X92:** Caudal igualado o superado el 5 % del tiempo (Qm5%), calculado para cada año haciendo la media.

**X93:** Caudal igualado o superado el 10 % del tiempo (Qm10%), calculado para cada año haciendo la media.

**X94:** Caudal igualado o superado el 25 % del tiempo (Qm25%), calculado para cada año haciendo la media.

**X95:** Caudal igualado o superado el 30 % del tiempo (Qm30%), calculado para cada año haciendo la media.

**X96:** Caudal igualado o superado el 50 % del tiempo (Qm50%), calculado para cada año haciendo la media.

**X97:** Caudal igualado o superado el 75 % del tiempo (Qm75%), calculado para cada año haciendo la media.

**X98:** Caudal igualado o superado el 95 % del tiempo (Qm95%), calculado para cada año haciendo la media.

**X99:** Media de los 18 caudales mayores (Q18x).

**X100:** Media de los 18 caudales menores (Q347x).

**X101 a X103:** Pendiente curva caudales clasificados (Pccc). Para analizar la pendiente de la curva de caudales clasificados se han desestimado el 5% de caudales mayores y menores, El resto de la curva se ha dividido en tres partes (5 al 25%; 25 al 75%; y 75 al 95%) siendo la pendiente de estas partes:

$$N_1 = \frac{Q_5 - Q_{25}}{20} \quad N_2 = \frac{Q_{25} - Q_{75}}{50} \quad N_3 = \frac{Q_{75} - Q_{95}}{20}$$

Así, se define el parámetro Pccc (**X101**) como la relación entre las pendientes anteriores expresada de la siguiente forma:

$$Pccc = \frac{N_1 - N_2}{N_2 - N_3}$$

Alternativamente, también se pueden considerar las relaciones simples de las pendientes dos a dos para el análisis de la forma de estas curvas de caudales clasificados a través de los cocientes Pccc1 (**X102**) y Pccc2 (**X103**) calculados de la siguiente forma:

$$Pccc1 = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{y} \quad Pccc2 = \frac{N_2}{N_3}$$

**X104 a X109:** Número de periodos de días consecutivos en los que los caudales están continuamente por debajo de un valor prefijado. Como valores prefijados se han tomado el 5% (spell5), 10% (spell10), 20% (spell20), 40% (spell40), 60% (spell60) y 80% (spell80) del caudal medio anual. Estos parámetros se han calculado con la ayuda del programa SPELL en AQUAPAK (Gordon *et al.*, 1992).

**X110 a X115:** Periodo de caudales bajos (spell-dur). Valor medio de la longitud del periodo en días en que los caudales están continuamente por debajo de un valor prefijado. Como valores prefijados se han tomado el 5% (spell-dur5), 10% (spell-dur10), 20% (spell-dur20), 40% (spell-dur40), 60% (spell-dur60) y 80% (spell-dur80) del caudal medio anual. Estos parámetros se han calculado con la ayuda del programa SPELL en AQUAPAK (Gordon *et al.*, 1992).

**X116 a X121:** Volumen de caudales bajos (def-vol). La cantidad de agua (expresada en porcentaje del caudal medio anual) que se requeriría para mantener los caudales circulantes por encima de un valor prefijado. Como valores prefijados se han tomado el 5% (def-vol5), 10% (def-vol10), 20% (def-vol20), 40% (def-vol40), 60% (def-vol60) y 80% (def-vol80) del caudal medio anual. Estos parámetros se han calculado con la ayuda del programa SPELL en AQUAPAK (Gordon *et al.*, 1992).

**X122:** Coeficiente de variación de los caudales diarios (CV).

**X123:** Desviación estándar de los caudales diarios, calculado para todo el periodo considerado en conjunto (Desv. Stand.) y para cada año haciendo la media (Desv. Stand.m).

**X124:** Coeficiente de variación de caudales intraanual (CVintra.), calculado como la media para todos los años del valor obtenido por la siguiente expresión:

$$CV_{\text{intra}} = \left( \frac{\text{Desv. Stand. } Q_{\text{diarios}}}{Q_m} \right)$$

**X125:** Desviación estándar de los caudales diarios (Desv. Stand.m), calculado para cada año haciendo la media.

**X126:** Coeficiente de variación de caudales medios anuales (Cvinter), calculado mediante la siguiente expresión:

$$Cv_{\text{inter}} = \frac{\text{Desv. Stand. } Q_m}{\text{módulo}}$$

**X127:** Índice de torrencialidad (IT), utilizado para definir el carácter torrencial de los ríos (Margalef, 1983) así como para regionalizar frecuencias de caudales altos (Dalrymple, 1960, citado en Gordon *et al.*, 1992). Se calcula como la media de los valores para cada año de la siguiente expresión:

$$I.T. = \frac{Q_{\text{máx}}}{Q_m}$$

**X128:** Índice de variabilidad de caudales utilizado por la O.P.H. de la C.H.E. (Variabilidad1m) que se calcula para cada año haciendo la media a través de la siguiente expresión:

$$\text{Variabilidad1m} = \sqrt{\frac{Q_{25\%}}{Q_{75\%}}}$$

**X129:** Índice de variabilidad de caudales propuesto por Grown & Marsh (2000) (Variabilidad2m) que se calcula para cada año haciendo la media a través de la siguiente expresión:

$$\text{Variabilidad2m} = \frac{Q_{10\%} - Q_{90\%}}{\text{mdiana}}$$

**X130:** Índice de usos de la cuenca, calculado como porcentaje de superficie agrícola más la mitad del porcentaje de superficie forestal. Se define a partir del hecho de que la superficie forestal reduce notablemente la producción de agua en una cuenca, que puede llegar a ser de cerca del 50% (por ejemplo Hobar Perry *et al.*, 2000) sobre todo en épocas de caudales bajos.

**X131:** Índice de usos de la cuenca, calculado como porcentaje de superficie forestal más la mitad del porcentaje de superficie agrícola.

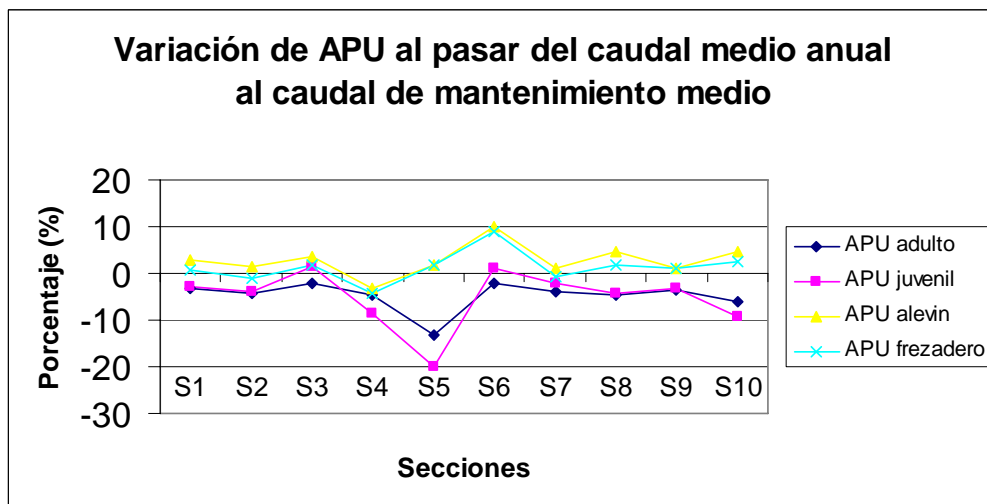
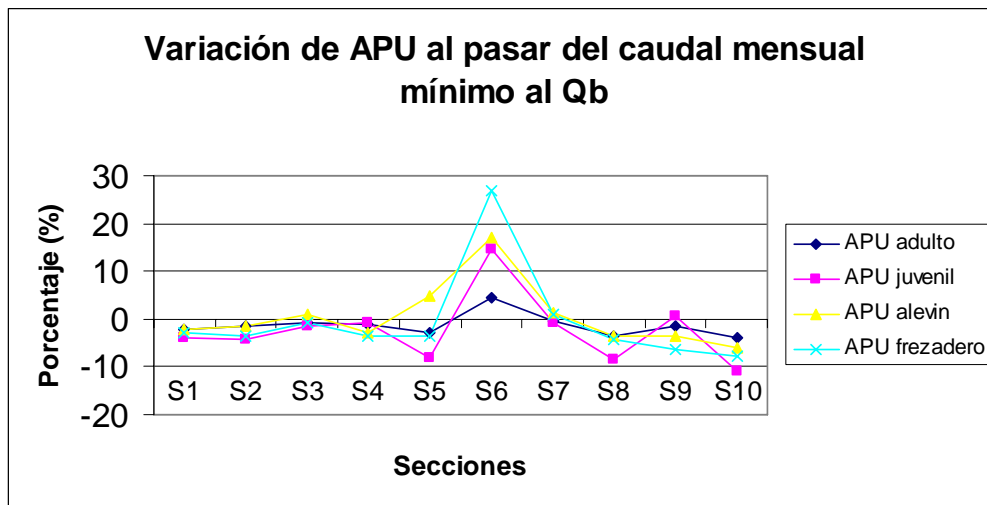
**X132:** Porcentaje de superficie forestal de la cuenca.

## **Anexo 2.**

Variación del área ponderada útil (APU) al aplicar los valores de  $Q_b$  respecto al mínimo caudal medio mensual

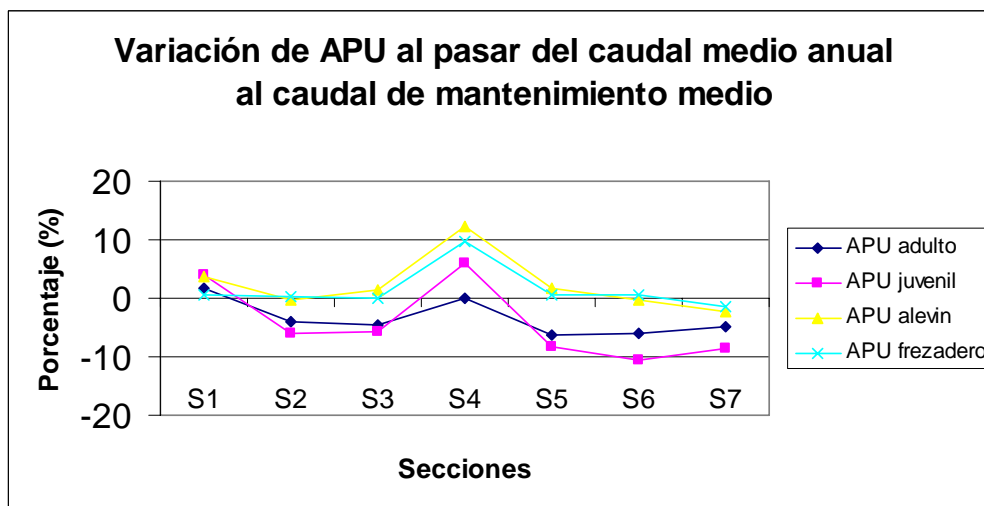
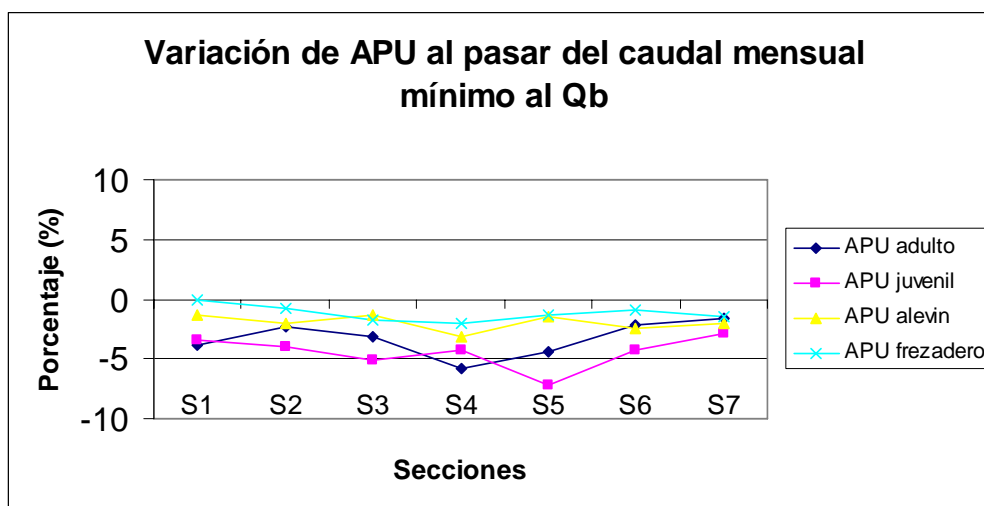
## RÍO BALIERA

	Qb-Qm mens min			Qbm medio-Qm anual		
	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
Adulto	-4	-1.34	4.6	-13.3	-4.8	-2.2
Juvenil	-10.9	-2.33	14.7	-20.1	-5.19	1.4
Alevin	-6	0.46	17	-3.1	2.76	10
Freza	-7.7	-0.45	26.9	-4.4	1.25	9.1



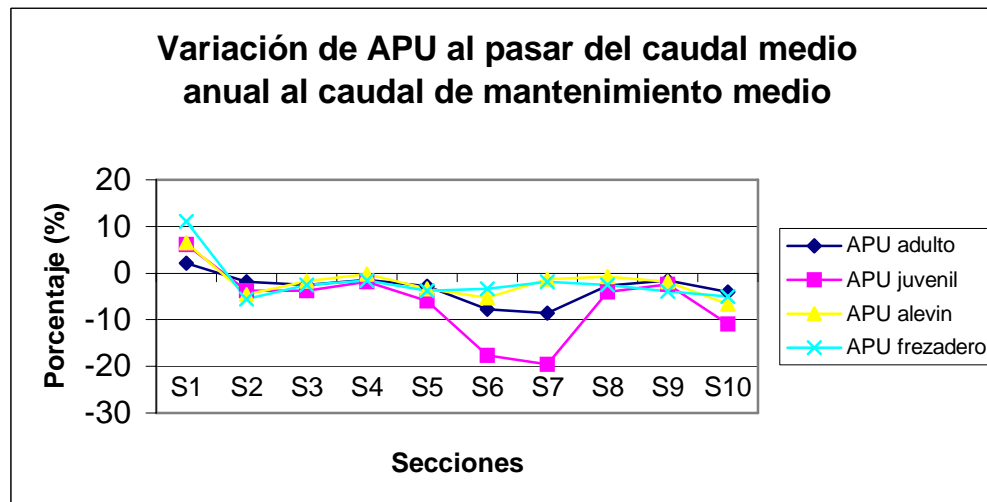
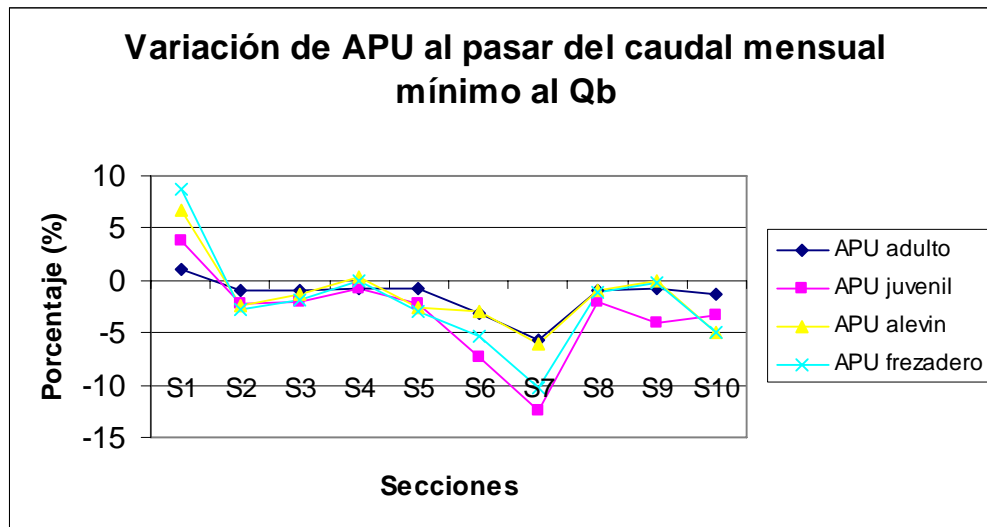
## RÍO CINQUETA

	Qb-Qm mens min			Qbm medio-Qm anual		
	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
Adulto	-5.8	-3.3	-1.6	-6.3	-3.4	1.7
Juvenil	-7.2	-4.5	-2.9	-10.6	-4.2	6.0
Alevin	-3.2	-2.0	-1.3	-2.2	2.4	12.2
Freza	-2.0	-1.2	0.0	-1.4	1.5	9.7



## RÍO VALLFERRERA

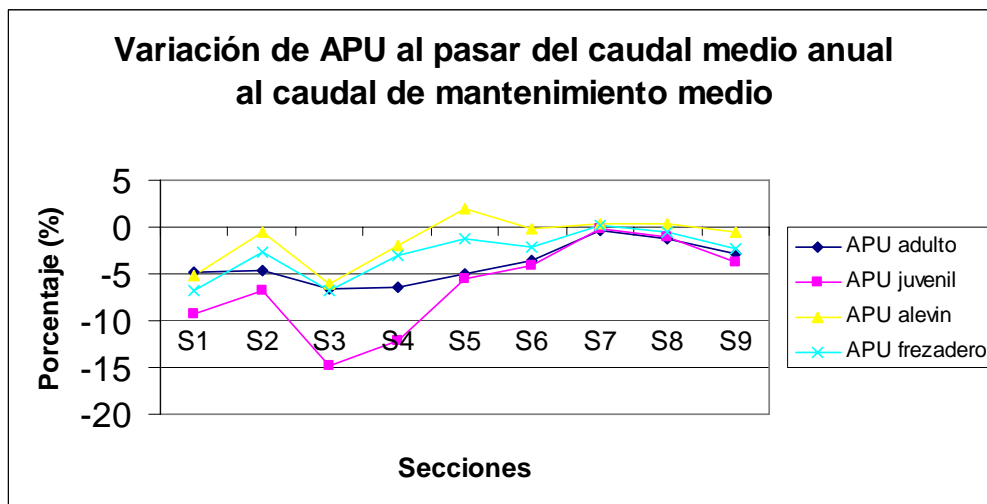
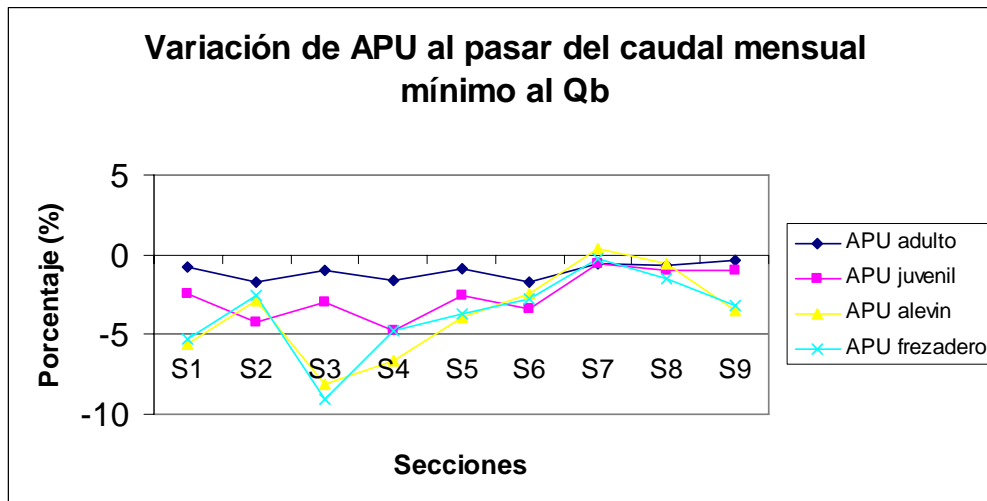
	Qb-Qm mens min			Qbm medio-Qm anual		
	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
Adulto	-5.7	-1.43	1	-8.6	-3.1	2.1
Juvenil	-12.5	-3.29	3.8	-19.5	-6.36	6.1
Alevin	-6	-1.38	6.8	-6.7	-1.93	6.5
Freza	-10.2	-2.07	8.7	-5.6	-1.89	11.1





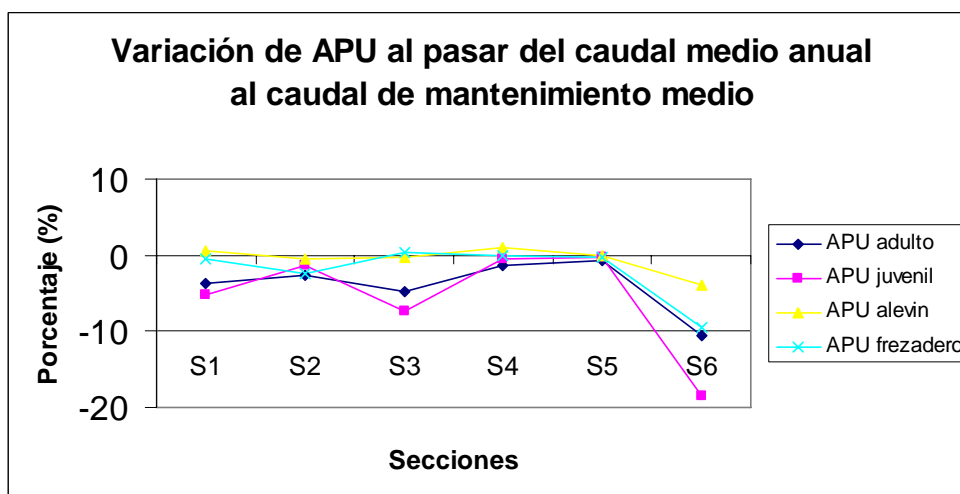
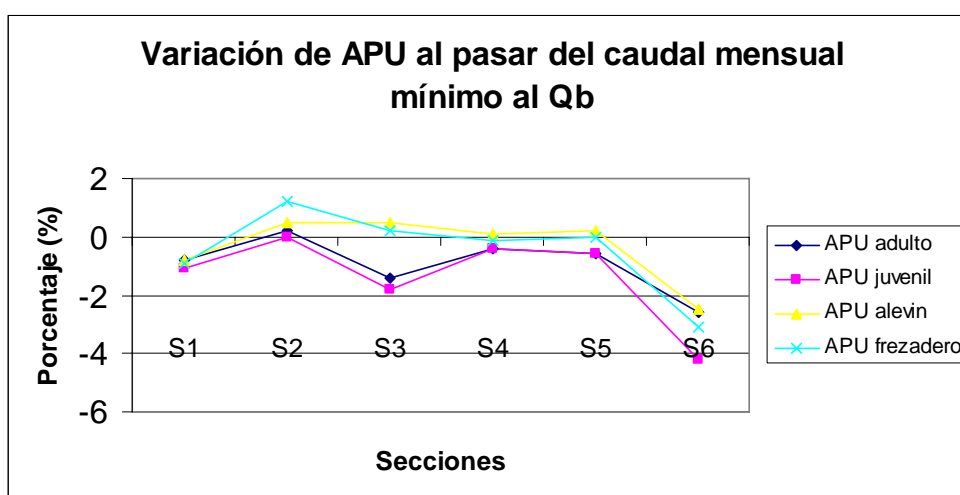
## RÍO CAROL

	Qb-Qm mens min			Qbm medio-Qm anual		
	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
Adulto	-1.7	-1.0	-0.3	-6.6	-3.9	-0.3
Juvenil	-4.8	-2.6	-0.6	-14.8	-6.4	-0.1
Alevin	-8.1	-3.7	0.4	-6.0	-1.3	1.9
Freza	-9.1	-3.7	-0.2	-6.8	-2.8	0.2



## RÍO NOGUERA RIBAGORZANA

	Qb-Qm mens min			Qbm medio-Qm anual		
	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
Adulto	-2.6	-0.9	0.2	-10.5	-4.0	-0.7
Juvenil	-4.2	-1.4	0.0	-18.5	-5.5	-0.2
Alevin	-2.5	-0.3	0.5	-4.0	-0.6	0.9
Freza	-3.1	-0.5	1.2	-9.4	-2.0	0.4



## RÍO SALLENT

	Qb-Qm mens min			Qbm medio-Qm anual		
	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
Adulto	-2.0	-1.1	-0.3	-4.5	-1.9	0.2

