



***Plan Hidrológico de la parte
española de la demarcación
hidrográfica del Duero.
2015-2021***

Anejo 4 Caudales ecológicos

Apéndice I Metodología empleada



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL DUERO

***PLAN HIDROLÓGICO DE LA PARTE ESPAÑOLA DE LA DEMARCACIÓN
HIDROGRÁFICA DEL DUERO (2015-2021)***

***Anejo 4 – CAUDALES ECOLÓGICOS
Apéndice I – METODOLOGÍA EMPLEADA***

Valladolid, diciembre de 2015

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN RÍOS PERMANENTES	5
2.1. Distribución temporal de caudales mínimos	5
2.1.1. <i>Métodos hidrológicos</i>	5
2.1.2. <i>Métodos hidrobiológicos</i>	10
2.1.3. <i>Resultados hidrobiológicos</i>	27
2.2. Distribución temporal de caudales máximos	28
2.2.1. <i>Capacidad natatoria de la ictiofauna</i>	29
2.2.2. <i>Procedimiento para la determinación de los caudales máximos</i>	29
2.3. Tasa de cambio y régimen de crecidas.....	33
2.3.1. <i>Caracterización del régimen de crecidas</i>	33
2.3.2. <i>Magnitud</i>	34
2.3.3. <i>Número de eventos a estudiar</i>	34
2.3.4. <i>Tasas de cambio</i>	35
2.3.5. <i>Duración del evento</i>	36
2.3.6. <i>Estacionalidad</i>	36
3. RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN RÍOS TEMPORALES O EFÍMEROS.....	39
3.1. Determinación de la temporalidad de los ríos.....	39
3.2. Determinación del periodo de cese anual.....	40
3.3. Determinación del periodo de cese hiperanual	43
3.4. Cálculo de los caudales ecológicos por métodos hidrológicos	44
4. MASAS DE AGUA MUY ALTERADAS HIDROLÓGICAMENTE.....	47
5. RÉGIMEN EN SEQUÍAS PROLONGADAS.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación de caudales demandados por las especies más restrictivas, en función del % de HPU requerido.	27
Tabla 2. Número de escalones y tiempo mínimo a utilizar en la fase de ascenso en función de la diferencia entre el caudal más bajo y el más alto, elaborada para el caso del Genil	36
Tabla 3. Número de escalones y tiempo mínimo a utilizar en la fase de descenso en función de la diferencia entre el caudal más bajo y el más alto, elaborada para el caso del Genil	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso del cálculo del caudal básico.....	7
Figura 2. Vectores resultantes para Q _{básico} y Caudal media móvil de orden único (Q ₂₁)	8
Figura 3. Representación esquemática de la metodología IFIM.	10
Figura 4. Toma de datos de topografía mediante Estación Total	13
Figura 5. Toma de datos del cauce mediante ecosonda acoplada a embarcación	13
Figura 6. Método de aforo de las Fajas Verticales.	15
Figura 7. Sustrato	16
Figura 8. Detalle de la calibración de los VDF's de una sección (transecto).....	18
Figura 9. Detalle de las curvas de gasto de altura-caudal de una sección (transecto)	18
Figura 10. Detalle la Simulación del perfil longitudinal de la lámina de agua	19
Figura 11. Detalle de la topografía representada en el BED	20
Figura 12. Detalle de la topografía representada en el MESH	20
Figura 13. Detalle del tramo representado en el RIVER 2D.....	21
Figura 14. Ejemplo Curvas HPU/Q para un río modelo	26
Figura 15. Ejemplo Curvas HPU/Q para otro cauce	26
Figura 16. Ejemplo de curvas de %HPU/Q de las especies y estadios más restrictivos de un tramo.	27
Figura 17. Coeficientes de variación del CEDEX.....	34
Figura 18. Selección de eventos.....	35
Figura 19. Rasgos más destacados de los dos métodos propuestos	47
Figura 20. Síntesis del criterio P-IAHRIS.....	48

1. INTRODUCCIÓN

El objeto de este documento es aclarar la metodología utilizada en la propuesta de caudales mínimos y máximos en la cuenca del Duero, sirviendo de documentación complementaria a la que se presenta en el Anejo 4 de caudales ecológicos. En concreto se han realizado estudios para la caracterización del régimen de caudales ecológicos en ríos permanentes y temporales, contemplado:

- Distribución temporal de caudales mínimos, independizando si se trata de ríos permanentes o no, ya que la metodología es diferente.
- Distribución temporal de caudales máximos.
- Tasa de cambio aceptable del régimen de caudales respecto al régimen de crecidas, incluyendo caudal punta, duración y tasa de ascenso y descenso, así como la identificación de la época del año más adecuada desde el punto de vista ambiental.
- Régimen que se debe aplicar cuando se sufran sequías prolongadas.

2. RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN RÍOS PERMANENTES

El régimen de caudales ecológicos incluye los siguientes componentes:

- Caudales mínimos que deben ser superados con objeto de mantener la diversidad espacial del hábitat y su conectividad, asegurando los mecanismos de control del hábitat sobre las comunidades biológicas, de forma que se favorezca el mantenimiento de las comunidades autóctonas.
- Caudales máximos que no deben ser superados en la gestión ordinaria de las infraestructuras, con el fin de limitar los caudales circulantes y proteger así a las especies autóctonas más vulnerables a estos caudales, especialmente en tramos fuertemente regulados.
- Distribución temporal de los anteriores caudales mínimos y máximos, con el objetivo de establecer una variabilidad temporal del régimen de caudales que sea compatible con los requerimientos de los diferentes estadios vitales de las principales especies de fauna y flora autóctonas presentes en la masa de agua.
- Caudales de crecida aguas abajo de infraestructuras de regulación, especialmente centrales hidroeléctricas de cierta entidad, con objeto de controlar la presencia y abundancia de las diferentes especies, mantener las condiciones físico-químicas del agua y del sedimento, mejorar las condiciones y disponibilidad del hábitat a través de la dinámica geomorfológica y favorecer los procesos hidrológicos que controlan la conexión de las aguas de transición con el río, el mar y los acuíferos asociados.
- Tasa de cambio máxima aguas abajo de infraestructuras de regulación, con objeto de evitar los efectos negativos de una variación brusca de los caudales, como pueden ser el arrastre de organismos acuáticos durante la curva de ascenso y su aislamiento en la fase de descenso de los caudales. Asimismo, debe contribuir a mantener unas condiciones favorables a la regeneración de especies vegetales acuáticas y ribereñas.

Como paso inicial evidente, se ha procedido a la clasificación de las masas conforme a los criterios de la IPH y de la “Guía para la Determinación del Régimen de Caudales Mínimos”. Así se han podido clasificar las masas como permanentes (*cursos fluviales que en, régimen natural, presentan agua fluyendo, de manera habitual, durante todo el año en su cauce*) y no permanentes, y dentro de éstas, como: estacionales, temporales y efímeras.

2.1. Distribución temporal de caudales mínimos

Se ha definido un régimen de caudales mínimos con una distribución temporal mensual, a partir de la combinación de métodos hidrológicos e hidrobiológicos (modelación de la idoneidad del hábitat en tramos fluviales representativos de cada masa) en las masas con estudio de campo. En el resto de las masas sólo se dispone del correspondiente estudio hidrológico.

2.1.1. Métodos hidrológicos

Es el grupo más simple de metodologías para estimar los caudales ambientales. Utilizan los registros históricos de caudal (datos diarios y mensuales) para derivar directamente de ellos las recomendaciones de caudales de mínimos mediante el estudio de medias, percentiles, etc.

Estos estudios hidrológicos se realizan tanto en el final de cada masa como en el punto de campo de aquellas masas en las que se han aplicado además métodos hidrobiológicos.

Tal y como establece la IPH, los métodos hidrológicos para obtener la distribución temporal de caudales mínimos se han basado en alguno de los siguientes criterios, diferenciándose al menos dos periodos hidrológicos homogéneos, que en el caso del presente estudio, ha sido una diferenciación mensual:

- La definición de variables de centralización móviles anuales de orden único, identificadas por su significación hidrológica (21 y 25 días consecutivos, por ejemplo), o de orden variable, con la finalidad de buscar discontinuidades del ciclo hidrológico. Para la detección de medidas de centralización de orden variable, se ha utilizado el método del caudal básico, basado en la metodología desarrollada por A. Palau y colaboradores (media móvil de 100 días).
- La definición de percentiles entre el 5 y el 15% a partir de la curva de caudales clasificados, que permitirán definir el umbral habitual del caudal mínimo.

Se ha trabajado a partir de caudales medios naturales restituidos a escala diaria, obtenidos de la desagregación de los datos naturales mensuales procedentes del modelo precipitación/aportación SIMPA 2 realizado por el CEDEX. La serie sobre la que se ha trabajado para caudales mínimos es la serie corta 1980-2006.

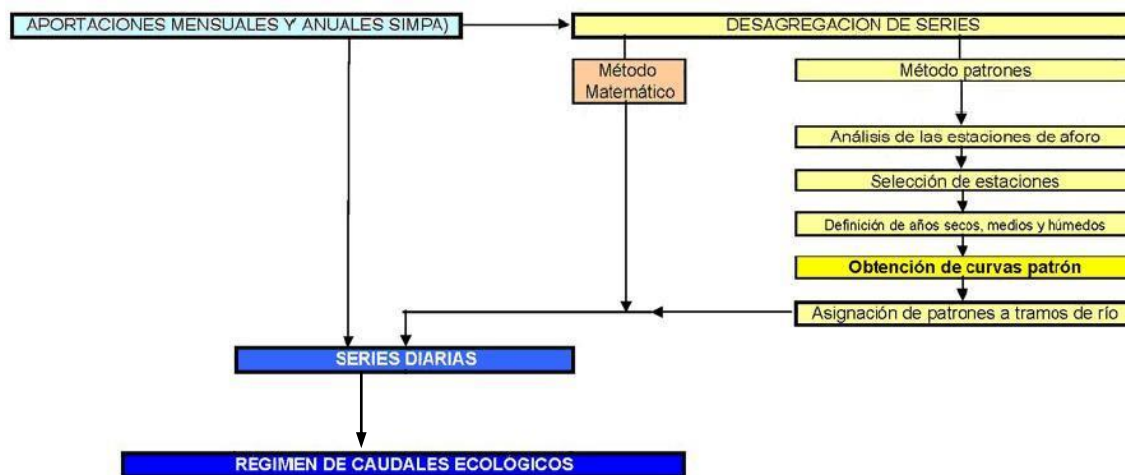
Obtención de series de caudales naturales diarios

Aunque algunos métodos hidrológicos pueden basarse en datos mensuales, la mayoría necesita de datos de caudales naturales diarios, siendo por tanto necesaria la desagregación de los datos mensuales a diarios, lo que puede entenderse como la primera de las verdaderas etapas de trabajo, de la cual se obtendrán los

resultados para los distintos aspectos a tratar. Así, para cada masa en estudio se ha buscado y aplicado una serie de patrones de distribución diarios correspondiente a la estación de control en régimen natural (o casi), situada en las proximidades y que tenga una serie de datos lo más amplia posible.

De este modo, las series mensuales naturales, se han multiplicado por el correspondiente coeficiente adimensional diario, con lo cual, las series resultantes tienen exactamente el mismo patrón temporal que la serie de la cual se obtuvieron dichos coeficientes. Es decir, ambas distribuciones estadísticas tienen el mismo parámetro de forma aunque el de escala será diferente, pero la autocorrelación temporal será idéntica.

La desagregación se ha realizado tanto para la serie larga (1940/1941 – 2005/2006), como para la serie corta (1980/1981 – 2005/2006).



Los resultados de la desagregación son válidos tanto para las masas permanentes como para las no permanentes.

Métodos derivados de la selección de percentiles (Qp5 y Qp15)

Según la IPH, uno de los métodos hidrológicos que pueden ser empleados es la definición de percentiles entre el 5 y 15 % a partir de la curva de caudales clasificados, que permitan definir el umbral habitual del caudal mínimo, tomando una serie de al menos 20 años. Se ha trabajado a nivel diario con una serie de datos comprendida entre 1980 a 2006.

La definición de un percentil, habitualmente situado entre el 5 y el 15% a partir de la curva de caudales clasificados, permite definir el umbral habitual del caudal mínimo a establecer para la determinación de un régimen ambiental de caudales.

Método del Caudal Básico

Está basado en la metodología desarrollada por el CEDEX a través de A. Palau, y colaboradores (Universidad de Lleida). Se trata de un método hidrológico que se ha desarrollado a partir de la idea de que el caudal que circula por un tramo de río (series hidrológicas) es la variable primaria que contiene toda la información necesaria para la organización física y biológica del ecosistema fluvial, y se fundamenta en una serie de cálculos matemáticos realizados en series de aportaciones naturales de periodicidad diaria.

El Caudal Básico (Qb) es el componente fundamental de la metodología, y corresponde al caudal mínimo necesario para que se conserve la estructura y función del ecosistema acuático afectado. Es el caudal mínimo que debe circular en todo momento por el río, aunque no siempre el recomendado por la metodología, como se verá más adelante.

Se deduce del estudio de discontinuidades en la tendencia de variación de los caudales mínimos, obtenidos a partir de series seleccionadas de caudales naturales medios diarios. La base de cálculo son las medias móviles obtenidas a partir de la fórmula:

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

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.

Los datos de partida para el cálculo del Qb son los registros históricos de las series de caudales medios diarios, “qij”, donde “j” son los distintos años considerados 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 n° de años de caudales medios diarios.

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), de tal forma que 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).

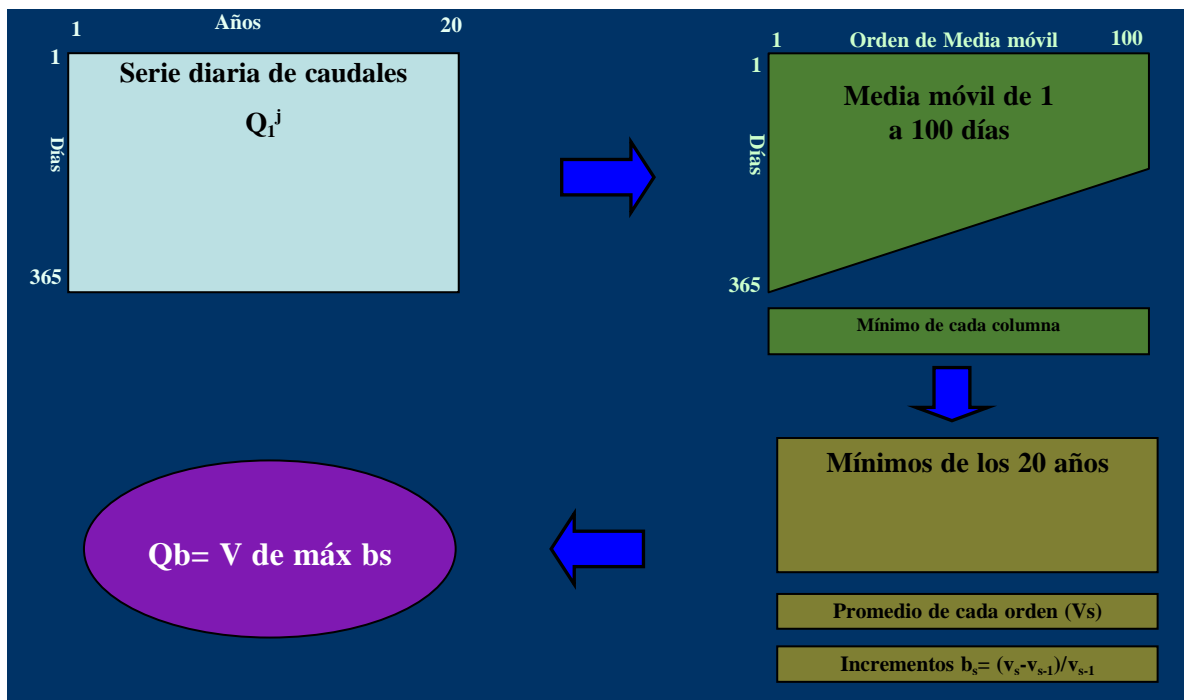
De cada una de las columnas se obtiene el valor mínimo, que correspondería al promedio del período de caudales medios mínimos diarios de 1, 2, 3, ..., 100 días consecutivos, y que tiende hacia el caudal medio anual (media móvil de orden 365), siendo por tanto siempre menor que él. Esto se repite para cada uno de los años considerados, y se obtiene una matriz de caudales mínimos de (n° de años) x100 datos.

A partir de la matriz de mínimos, se calculan las medias aritméticas por columnas, obteniéndose una serie de 100 valores (vector vs) sobre el que se calcula el mayor incremento relativo entre cada par de valores consecutivos, siendo el Qb el caudal mayor que define dicho par de valores. A continuación se presenta un esquema orientativo del proceso de cálculo del caudal básico a partir de una matriz inicial de caudales medios diarios de “n” años.

La flexibilidad de esta metodología permite variar, bajo un criterio adecuado, algunos de sus cálculos. Así sucede con la parte final del cálculo del Qb, que puede realizarse, tal y como considera el propio autor, procediendo de la siguiente manera:

En lugar de calcular directamente el vector media en función de la matriz de (n° de años) x100 obtenida, se calculan los incrementos relativos para cada una de las filas de dicha matriz, así como el caudal correspondiente al máximo incremento en cada una de ellas. De esta forma se obtiene un número de caudales mínimos igual al número de años del período de estudio, siendo el Caudal Básico la media de éstos (o, bajo el criterio del hidrólogo, la mediana, el mínimo, el máximo, o cualquier otra función estadística adecuada al régimen natural de caudales del río).

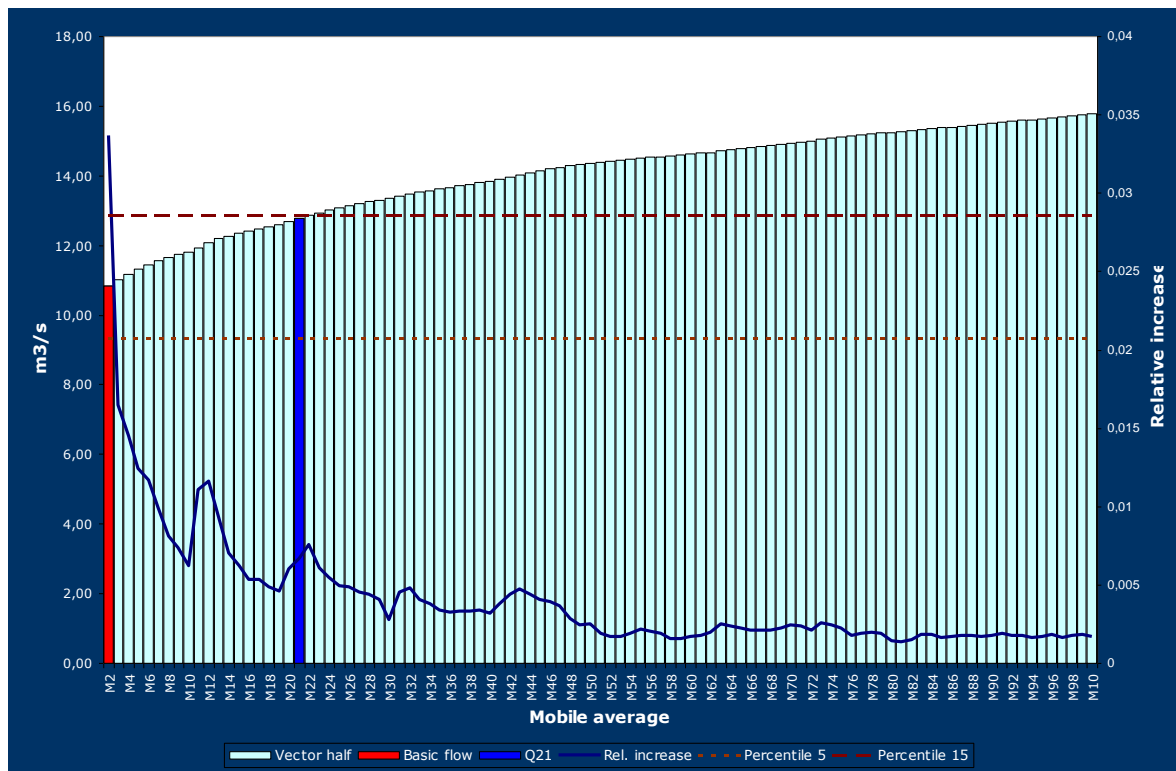
Figura 1. Esquema del proceso del cálculo del caudal básico



El mes en el que se inician las series de datos tiene mucha importancia para el cálculo del Qb 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 podría dar lugar a un cálculo erróneo del Qb. Por ello para el cálculo del Qb 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.

El caudal mínimo, ya sea el obtenido de aplicar el método del caudal básico o cualquier otro método, hay que transformarlo en un régimen anual. Aunque la IPH permite que se proponga únicamente un caudal de estiaje y otro de aguas altas, las metodologías más usuales proponen series de caudales mensuales que sean proporcionales a los caudales naturales.

Figura 2. Vectores resultantes para Qbásico y Caudal media móvil de orden único (Q21)

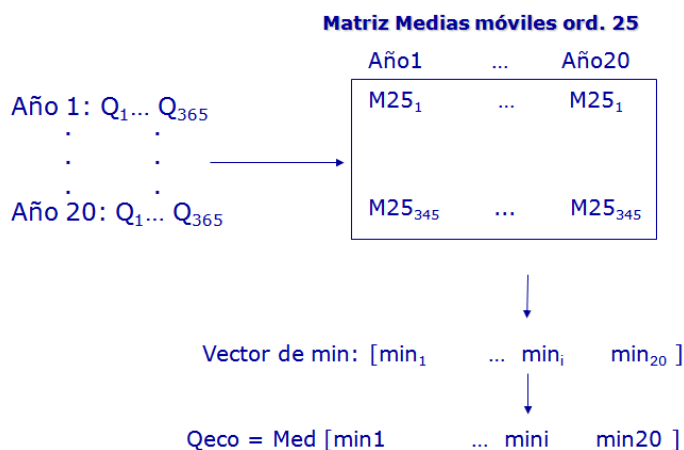


Método de la media móvil de orden 21 y 25

La media móvil de orden 25 es un método estadístico desarrollado en la Escuela de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid bajo la dirección de Diego García Jalón y que representa como caudal ecológico el definido por la media de los caudales medios mínimos correspondientes a 25 días consecutivos, calculada sobre la serie hidrológica seleccionada.

La IPH hace también referencia a la media móvil de orden 21, que se calcula de la misma forma, si bien con un periodo de 21 días consecutivos.

El procedimiento de cálculo queda esquematizado en la siguiente figura, considerando una serie de 20 años.



El factor de variación

El caudal mínimo, ya sea el caudal básico (Qbas) o el correspondiente al Q21 ó Q25, e incluso los obtenidos por métodos hidrobiológicos que se describen más adelante en este documento, hay que convertirlo en un régimen anual. El factor de variación es el encargado de adecuar el régimen de caudales mínimos a las tendencias de variación del hidrograma natural.

La IPH permite que se proponga únicamente un caudal de estiaje y otro de aguas altas, pero las metodologías más usuales proponen series de caudales mensuales que sean proporcionales a los caudales naturales.

Se ha trabajado con distintos factores de variación para ver su repercusión: el propuesto en el método del Caudal Básico, también con su variante de la raíz cúbica en lugar de cuadrada; otro de formulación similar pero basado no en caudales medios mensuales sino en el resultado de los percentiles 15 de cada mes, e incluso con otro que proporciona un rango de variación comprendido entre 1, para el mes de menor caudal y 2 para el de mayor caudal. La formulación de los distintos factores de variación empleados es la siguiente:

Factor Variación 1	Factor Variación 2	Factor Variación 3	Factor Variación 4
$F_{var 1} = \sqrt{\frac{Q_i}{Q_{min}}}$	$F_{var 2} = \sqrt[3]{\frac{Q_i}{Q_{min}}}$	$F_{var 3} = 1 + \sqrt{\frac{Q_i - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}}}$	$F_{var 4} = \sqrt{\frac{Perc 15_i}{Perc 15_{min}}}$

Donde “Qi” es el caudal natural del mes “i”, “Qmin” es el caudal natural del mes más seco, “Qmax” es el caudal natural del mes más húmedo. Por su parte, “Perc 15i” es el percentil 15 del mes “i” y “Perc15min” es el percentil 15 de mes más seco.

Por su parte, hay que mencionar mientras los percentiles 5 y 15 a nivel anual se obtienen de toda la serie de datos, los percentiles mensuales se obtienen del cálculo de los datos diarios de cada mes, con lo que en este caso no se aplican factores de variación, pues la misma sale de la propia variación de la serie.

El factor de variación tiene una gran importancia. En la figura siguiente se aprecia el porcentaje que supone sobre el caudal natural, el régimen de caudales ecológicos que se defina, apreciándose una gran diferencia entre la adopción de uno u de otro. Así si se toma para el Q básico el factor de variación 4, el régimen de caudales supondría un 20% de la aportación anual, mientras que si se adopta el factor de variación 1, dicho porcentaje ascendería a un 32%; es decir, un 12% de diferencia.

La diferencia estriba en la forma de la curva que genera la formulación de dichos factores de variación, más plana al adoptar el factor de variación 4. Es decir, partiendo del mismo caudal mínimo de estiaje, 5,31 m3/s, la amplificación que genera mes a mes una fórmula u otra es muy distinta, dando como resultado un caudal medio anual de 6,29 m3/s con el factor de variación 4, frente a un 10,13 m3/s con el factor de variación 1.

Finalmente conviene decir que aunque los factores de variación se han determinado de forma mensual, podrían realizarse agrupaciones de ellos, por ejemplo de forma estacional.

MEDIA DE CAUDALES (m³/s)													Repercusión sobre aportación natural con FV1 = 32%		
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	M	J	J	Ag	S	Media anual	% s/Qnat	
Q natural	37,23	49,49	56,16	48,78	38,12	37,38	34,90	30,96	15,58	9,57	8,00	13,38	31,72	100%	
Perc 5 *	7,66	7,52	7,12	9,99	9,29	10,81	10,47	8,69	6,72	5,89	5,89	7,75	7,99	25%	
Perc 15 *	9,93	11,59	12,90	11,86	13,79	13,93	14,95	12,53	7,91	7,79	7,79	7,75	11,06	35%	
Factor de variación	Qaforado												-	-	
Factor de variación 1	F var 1	2,15	2,48	2,64	2,46	2,17	2,15	2,08	1,96	1,39	1,09	1,00	1,34	-	-
	Q básico	11,40	13,15	14,00	13,05	11,54	11,42	11,04	10,40	7,37	5,78	5,31	7,10	10,13	32%
	Q 21	13,27	15,30	16,30	15,19	13,43	13,30	12,85	12,10	8,58	6,73	6,18	8,26	11,79	37%
	Q 25	13,59	15,67	16,69	15,56	13,75	13,62	13,16	12,40	8,79	6,89	6,33	8,46	12,08	38%
Factor de variación 2	F var 2	1,66	1,83	1,91	1,82	1,68	1,67	1,63	1,56	1,24	1,06	1,00	1,21	-	-
	Q básico	8,84	9,72	10,14	9,67	8,91	8,85	8,65	8,31	6,61	5,62	5,31	6,44	8,09	25%
	Q 21	10,29	11,31	11,80	11,26	10,37	10,30	10,07	9,67	7,69	6,54	6,18	7,50	9,41	30%
	Q 25	10,54	11,59	12,08	11,53	10,62	10,55	10,31	9,91	7,88	6,70	6,33	7,68	9,64	30%
Factor de variación 3	F var 3	1,78	1,93	2,00	1,92	1,79	1,78	1,75	1,69	1,39	1,18	1,00	1,36	-	-
	Q básico	9,45	10,24	10,62	10,20	9,51	9,46	9,28	8,98	7,41	6,25	5,31	7,24	8,66	27%
	Q 21	11,00	11,92	12,36	11,87	11,07	11,01	10,80	10,45	8,62	7,27	6,18	8,43	10,08	32%
	Q 25	11,26	12,21	12,66	12,16	11,34	11,27	11,06	10,70	8,83	7,45	6,33	8,63	10,33	33%
Factor de variación 4	F var 4	1,13	1,22	1,29	1,23	1,33	1,34	1,39	1,27	1,01	1,00	1,00	1,00	-	-
	Q básico	6,00	6,48	6,84	6,55	7,07	7,10	7,36	6,74	5,35	5,31	5,31	5,31	6,29	20%
	Q 21	6,98	7,54	7,96	7,63	8,23	8,27	8,57	7,84	6,23	6,18	6,18	6,18	7,32	23%
	Q 25	7,15	7,72	8,15	7,81	8,43	8,47	8,77	8,03	6,38	6,33	6,33	6,33	7,49	24%

Repercusión sobre aportación natural con FV4 = 20%

2.1.2. Métodos hidrobiológicos

Los métodos de modelación de la idoneidad de hábitat se basan en la simulación hidráulica, acoplada al uso de curvas de preferencia del hábitat físico para la especie o especies objetivo, obteniéndose curvas que relacionen el hábitat potencial útil con el caudal en los tramos seleccionados.

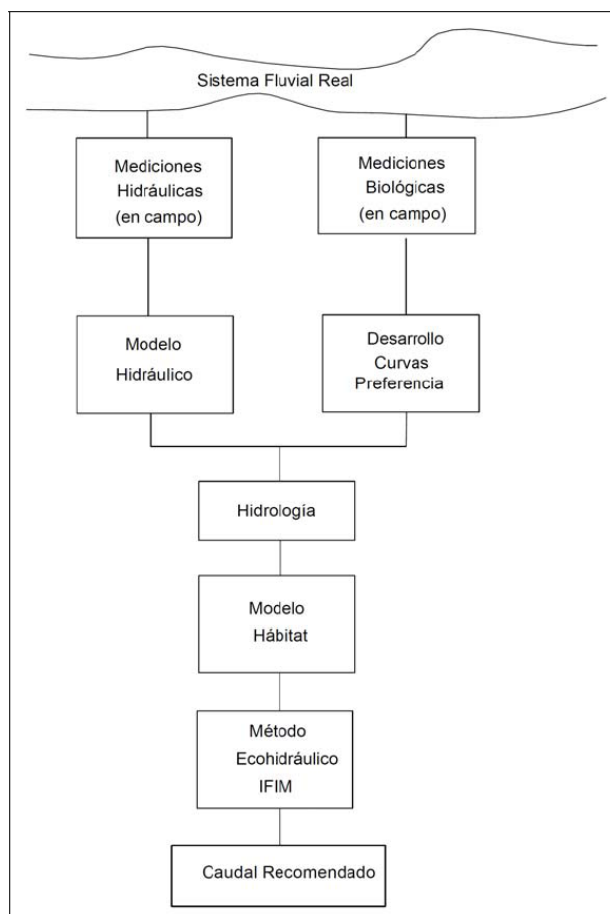
Para el desarrollo de estos trabajos se ha utilizado la metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology), la cual analiza las diferentes condiciones hidráulicas que se producen en un cauce al variar los caudales circulantes, relacionando además las preferencias de las especies seleccionadas mediante el uso de curvas, y obteniendo finalmente una relación entre el caudal circulante y el hábitat disponible para la especie.

El esquema conceptual de la metodología de modelización del hábitat parte de dos puntos básicos:

- Las curvas de preferencia de la fauna
- Un modelo hidráulico fluvial

Fundiendo ambas ideas, el modelo hidráulico, que simula las condiciones de los distintos segmentos del río en función de los caudales circulantes y el valor potencial del hábitat fluvial, que nos indica las condiciones en las que se van a encontrar las especies que pueden estar presentes, se llega al concepto del Hábitat Potencial Útil, herramienta con la que se planteará el régimen ambiental de caudales.

Figura 3. Representación esquemática de la metodología IFIM.



El ajuste mediante la modelación de la idoneidad del hábitat se ha basado en la simulación hidráulica acoplada al uso de curvas de preferencia del hábitat para la especie o especies objetivo, como indica la IPH.

Para ello, se han realizado las correspondientes modelizaciones en 1D con el programa Rhyhabsim (Ian G. Jowett, NIWA, NZ); y en 2D con el RIVER 2D de la Universidad de Alberta (Steffler, 2002), en algunas de las masas no vadeables.

Selección de masas para la simulación hidrobiológica

Se ha partido de las masas de agua tipo río definidas en cada una de las cuencas y se ha procedido a una clasificación de la información disponible. Para la caracterización de esos tramos, se ha trabajado con las capas SIG suministradas por la Confederación Hidrográfica del Duero, con información sobre:

- Masas de agua
- Embalses y azudes, destino de los mismos
- Centrales hidroeléctricas y minicentrales
- LIC's y ZEPAs y otros espacios protegidos
- Regadíos
- Canales, conducciones, etc.
- Masas de agua subterránea
- Ecotipos
- Estaciones de aforo

Después de la caracterización de los tramos según los datos de partida, se seleccionaron como listado previo de trabajo una serie de tramos que fueran representativos de la cuenca, cubriendo todos sus ecotipos.

Para la selección de los tramos se ha tenido en cuenta:

- Tramos bajo embalse.
- Tramos bajo embalse donde ya se habían definido unos determinados Caudales ecológicos en el anterior plan de cuencas.
- Tramos dentro de espacios Protegidos.
- Tramos donde pudiesen existir conflictos de usos (abastecimiento, riegos, centrales hidroeléctricas...).

Tras varios encuentros y contraste de opiniones con la Oficina de Planificación, se llegó a unos listados con las masas definitivas sobre las que trabajar desde un punto de vista hidrobiológico.

Trabajo de campo

La modelización de hábitat requiere de unos trabajos de campo intensos en cada una de las fases que se describirán a continuación, y la forma de recogida de datos de campo será diferente según la modelización sea unidimensional ó bidimensional. En cualquier caso, antes de la toma de datos en campo, ha sido necesaria la realización de unos trabajos de gabinete.

Primero, se ha efectuado un estudio de las posibles zonas para ubicar los estudios y facilitar las tareas de campo, mediante ortofotos, cartografía de la zona, datos impress, puntos de pesca EFI's... para conocer la accesibilidad del tramo, la existencia o no de barreras e irregularidades que puedan afectar al flujo.

Para la localización del punto de muestreo, se ha buscado una zona representativa entre unos 150-300 m. de longitud. Para ello se ha valorado la representatividad morfológica, de mesohábitats, la vegetación de ribera... también se han considerado las entradas y salidas de agua. Se ha intentado que los puntos de muestreo tuviesen una proporción de mesohábitats semejante al tramo anteriormente recorrido, así como unas series de características hidráulicas que facilitasen el calibrado del modelo, siendo importante la introducción en el tramo de secciones de control o transectos que permitan realizar aforos de muy buena calidad.

Una vez seleccionado el tramo, se ha procedido a la toma de datos de coordenadas GPS's en los puntos que se creían necesarios y localización de las distintas secciones transversales ó transectos. Estos transectos constituyen una línea recta aproximadamente transversal al flujo, a lo largo de la cual se miden las condiciones hidráulicas. El criterio de ubicación y número de transectos ha sido diferente según el tipo de modelización que vaya a ser llevada a cabo:

Modelos Unidimensionales: los transectos han de representar todos los distintos tipos de mesohábitats del tramo de estudio. Además, en relación con la simulación hidráulica conviene situarlos antes y después de las pérdidas singulares de energía, como resalto hidráulico, contracción y expansión, bajada brusca del fondo, etc., y también en cada cambio brusco de pendiente de lámina de agua.

Una vez establecidos la posición de los transectos (perpendiculares al flujo), se han marcado en ambas orillas (siempre que ha sido posible), con el número del transecto y orilla, según la dirección del flujo, enumerando los transectos desde aguas abajo hacia aguas arriba. El marcaje dependerá de la zona a marcar y de la existencia o no de elementos fijos (piedras, troncos...). En caso de que no fuese posible, se han utilizado estacas de madera ó de metal, clavos en las propias piedras...

Tiene como finalidad que el marcaje perdure en el tiempo hasta la siguiente campaña de campo, ya que es la única forma de poder volver a medir en los mismos transectos para poder calcular la curva de gasto de los mismos, y la única forma de tener elementos fijos con los que relacionar la altura de la lámina de agua de una a otra campaña de campo. En caso contrario habría que proceder a reproducir la localización del transecto mediante mediciones de su relación con el anterior y posterior, con la consiguiente posibilidad de error.

Modelo Bidimensional: únicamente se han realizado los transectos que se han creído necesarios para la medición del caudal, mucho menor al número de transectos que en un tramo unidimensional. Para la simulación bidimensional no es necesario que queden representados los cambios hidráulicos ya que éstos quedan definidos por la detallada topografía tomada en el tramo.

La calidad de aforo del inicio y del final del tramo de estudio conviene que sea excelente, sin una entrada y una salida hidráulicamente compleja, ya que puede ocasionar problemas al correr el modelo.

Una vez seleccionado ya el tramo y marcados los transectos que se van a medir, es importante que todo el trabajo topográfico y de hidrometría se realice en un plazo breve de tiempo, para que no existan cambios relevantes en el caudal circulante durante el tiempo de trabajo. Para controlar estos cambios y hacer los ajustes pertinentes, se colocaban varillas o reglas clavadas en una zona con agua, tomando su altura de agua cada varias horas, a la entrada ó salida del tramo.

Como se ha comentado, para la simulación del hábitat físico se ha seleccionado un tramo de estudio representativo de la masa, de distinta longitud en función de la entidad del río, características del tramo, método de simulación, etc. En general entre 150 y 300 m, si bien en ocasiones se ha acudido a distancias bastante superiores.

Por su parte, se ha intentado que el número de transectos fuese entre 12 y 15, si bien en tramos con excesivo caudal o en los que se han presentado problemas este número ha podido ser menor.

Los trabajos de campo se han realizado en dos campañas. En la primera de las campañas, se ha hecho el levantamiento topográfico y la toma de datos de sustrato, así como la toma de datos para el cálculo del caudal de calibración. En la segunda de las campañas, únicamente se han tomado datos de cota de lámina de agua y caudal, para el cálculo de las curvas de gasto.

A continuación se explica de qué manera se ha procedido a la toma de datos en el campo.

Topografía

La toma de datos topográficos variará en función del tipo de modelización que se vaya a llevar a cabo en el tramo de estudio. Como los modelos se han utilizado para el cálculo de los caudales mínimos y para la validación hidrobiológica de caudales máximos, ha sido necesario la toma de datos de topografía del lecho, y desde las orillas hasta el bankfull, estudiando previamente el terreno y buscando la correcta identificación del mismo (por estudio de los puntos más altos de depósito de sedimentos, cambios en la vegetación, cambios de pendiente en la sección transversal, cambio en los materiales de las orillas, socavación de orillas, líneas de coloración en rocas).

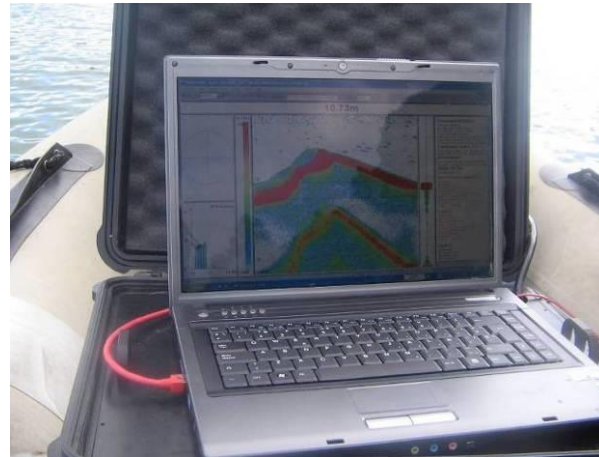
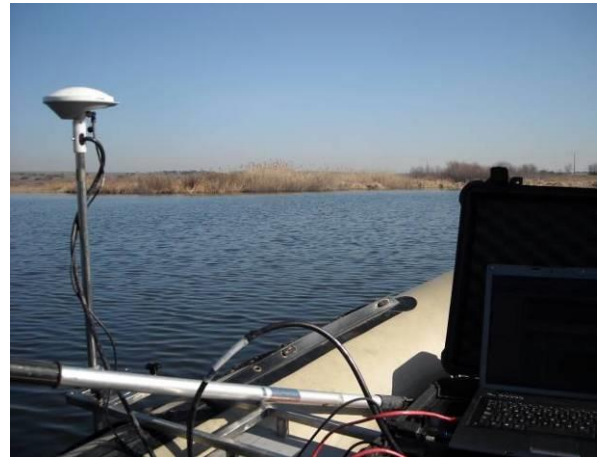
La topografía para las simulaciones hidráulicas en 1D se ha realizado mediante estación total. Se ha recogido la información topográfica de las secciones transversales definidas tanto dentro como fuera del cauce. También se han cogido los datos de la cota de lámina de agua en cada transecto, para el cálculo de la curva de gasto, así como los datos topográficos de las varillas, estacas, piedras...ó elementos utilizados para el marcaje de los tramos. Es muy importante, porque es la única manera de relacionar la primera y la segunda campaña, y como se ha explicado anteriormente, relacionar las cotas de lámina de agua a elementos fijos.

Figura 4. Toma de datos de topografía mediante Estación Total

Para poder obtener el modelo hidráulico bidimensional, es necesario recoger en campo la información topográfica tri-dimensional. Los datos de campo consisten en nodos o puntos topográficos de coordenadas X, Y, Z y tipo de sustrato, tomados mediante estación total de topografía y georreferenciados en campo mediante GPS. Para tramos no vadeables ha sido necesario el uso de ecosonda para tomar la batimetría del lecho, también georreferenciados con GPS.

Para la obtención de un buen modelo digital del terreno se han tomado datos especificados como líneas de rotura (breaklines), al menos pie de orilla/talud, cabeza de talud y otros elementos singulares (bordillos o zapatas de puentes o canales, etc.).

La cota de la lámina de agua es crucial para la posterior simulación hidrobiológica, así como los datos topográficos de los elementos utilizados para el marcaje de los tramos.

Figura 5. Toma de datos del cauce mediante ecosonda acoplada a embarcación

Hidrometría

La medición del caudal se realizado de distinta manera para tramos en 1 dimensión que en 2 dimensiones:

En la modelización unidimensional, para la medición de la velocidad se ha utilizado un correntómetro. El método empleado con éste es el de las fajas verticales, en las que las mediciones de un río se calcula utilizando las mediciones de velocidad y profundidad, realizadas en cada una de las secciones transversales definidas.

Para la determinación del caudal que pasa por una sección transversal, se requiere saber el caudal que pasa por cada una de la subsecciones en que se divide la sección transversal. Para ello se ha seguido el siguiente procedimiento:

La sección transversal del río donde a aforar se divide en varias fajas verticales o subsecciones, tal como se puede observar en la figura que se muestra más abajo. El número de fajas depende del caudal estimado que podría pasar por la sección: En cada subsección, no debería pasar más del 10% del caudal estimado que pasaría por la sección. Otro criterio es que, en cauces grandes, el número de subsecciones no debe ser menor de 20, en la tabla que se muestra a continuación se presenta el criterio tomado para realizar las subsecciones de un transecto:

El ancho de la sección transversal (superficie libre del agua) se divide en tramos iguales, cuya longitud es igual al ancho superior de la sección transversal dividido por el número de subsecciones calculadas.

Anchura lámina de agua	Número de subsecciones
< 4m	15
4-8m	20
> 8m	25

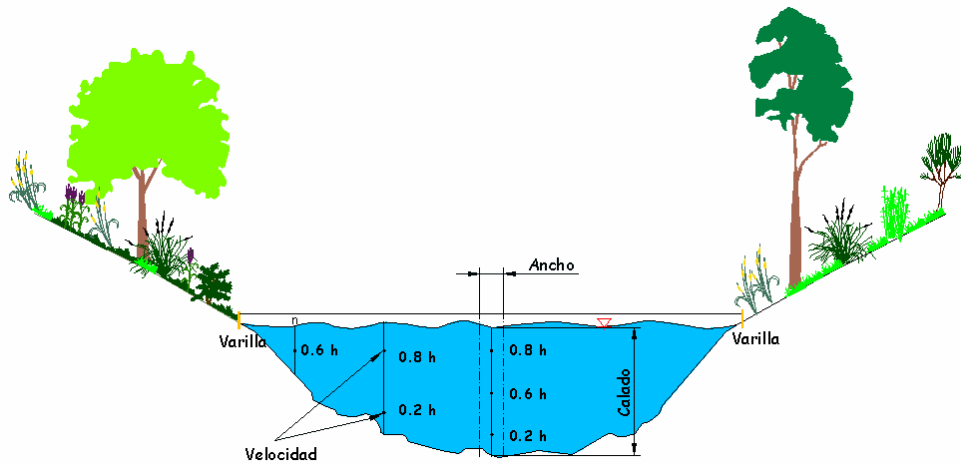
En cada tramo se trazan verticales, hasta alcanzar el lecho. La profundidad de cada vertical se puede medir con la misma varilla del correntómetro que está graduada. Las verticales se trazan en el mismo momento en que se van a medir las velocidades. En cada una de las fajas verticales el número de mediciones a realizar vendrán definidas por el calado presente en cada faja:

Calado de la Faja	Número de mediciones	Profundidad de lectura del correntómetro
0 - 0.45 m	1	0.60h
0.45-1.20m	2	0.20h / 0.8h
> 1.20m	3	0.2h / 0.6h / 0.8h

Se obtiene la velocidad promedio del agua en cada vertical. La velocidad promedio del agua en cada faja vertical es el promedio de las velocidades a 0.2h, 0.8h y dos veces la velocidad a 0.6h, que encierran la subsección.

El caudal de agua que pasa por el río es la suma de los caudales que pasan por las subsecciones.

Figura 6. Método de aforo de las Fajas Verticales.



Para la modelización bidimensional, en caso de ser un tramo no vadeable, se han realizado varios transectos de medidas de caudal, con un caudalímetro aforador batimétrico con control remoto, pasándolo, ayudado por una cuerda, transversalmente, perpendicularmente al flujo. De ésta manera se toman los registros de caudal, que posteriormente se descargan en el ordenador, obteniendo automáticamente el valor del caudal medido. En el caso de ser tramos vadeables se ha procedido con el molinete, midiendo los transectos marcados como se explica en el apartado anterior de modelos unidimensionales.

Figura 7. Sustrato**Molinete****Caudalímetro aforador batimétrico**

La toma de datos de sustrato vería según el tramo sea unidimensional ó bidimensional, ya que los requerimientos de entrada son diferentes en cada modelo:

- Para los tramos unidimensionales se han tomado datos de sustrato para cada una de las celdas en las que se ha dividido el transecto. El dato se toma como % de sustrato (por ejemplo, 25% de grava, 25% de arena y 50% roca madre).
- La toma de datos de sustrato para los modelos bidimensionales se ha realizado mediante croquis. Una vez observados los resultados en gabinete, esta es la base para asignar polígonos de sustrato al modelo bidimensional de una forma sencilla.

Los tipos de sustrato deben ser coherentes con los utilizados en estudios de microhábitat, ya que en la simulación se toman estos datos de campo para evaluar el hábitat con las funciones de idoneidad disponibles. Se seguirá la siguiente clasificación según el diámetro medio (Martínez Capel, 2000), simplificada a partir de la American Geophysical Union:

- 1 Limo: < 62 μ m. L
- 2 Arena. 62 μ m. – 2 mm. A
- 3 Gravilla. 2 - 8 mm. GV
- 4 Grava. 8 – 64 mm. GR
- 5 Cantos Rodados. 64 – 256 mm. CR
- 6 Bloques o bolos. > 256 mm. B
- 7 Roca Madre. RM
- 8 Vegetación. V

Aparte, se ha realizado la toma de otros tipos de datos, recogiendo toda la información posible para la posterior simulación hidrobiológica del tramo (tipo de mesohábitat y de calidad de aforo para cada transecto, croquis del tramo, fotografías aguas arriba y aguas abajo de cada transecto, así como fotografías a cada una de las orillas...) y para la identificación y posterior localización de los tramos y transectos (fotografías, toma de datos de GPS siempre que sea posible, croquis, descripciones de las localizaciones...).

Si en algún momento se registra aumento ó disminución de caudal en la regleta, hay que apuntar esa variación.

Simulación de hábitat

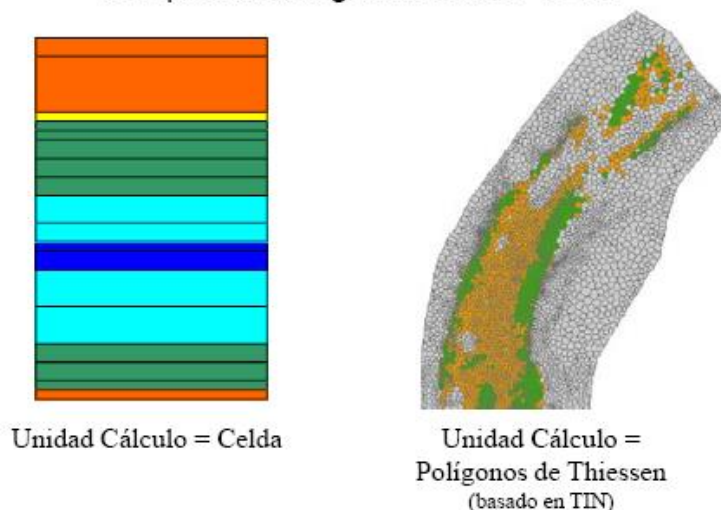
Las características hidráulicas de un río se generan como consecuencia del régimen de caudales; en un determinado instante, la velocidad y la profundidad de las aguas y la sección mojada sólo dependerán de la cantidad de agua, es decir, del caudal, si suponemos que la sección transversal del cauce es invariable. Se trata de ir viendo como a medida que varía este caudal, se generan nuevas condiciones de profundidad, velocidad y sección mojada. Esto representa un problema de hidráulica fluvial que no está resuelto satisfactoriamente y requiere acudir a un proceso de simulación hidráulica.

Para la simulación hidrobiológica de los tramos seleccionados se han utilizado dos programas diferentes:

- Programa en 1 dimensión: RHYHABSIM (“River Hydraulic and Habitat Simulation”; Jowett, I.G, 1989)

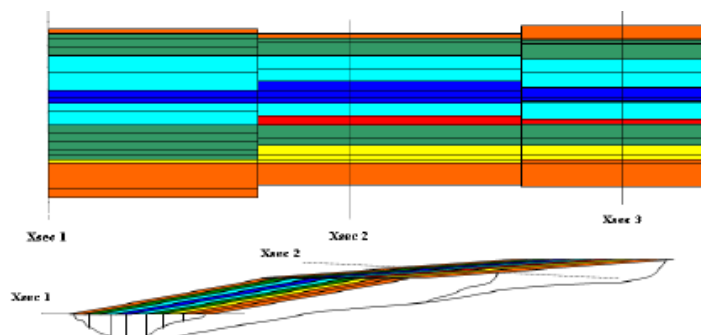
- Programa en 2 dimensiones: River2D (Ghanem, A.H., et al, 1996) de la University of Alberta-Canada.

Cálculo de HPU comparativa según modelos 1D-2D



Como se ha comentado, se ha utilizado el programa RHYHABSIM (Ian G. Jowett, NIWA, NZ) para la SIMULACIÓN HIDRÁULICA UNIDIMENSIONAL, que es un programa similar al PHABSIM (el utilizado durante muchos años en la metodología IFIM) pero con mayores prestaciones.

El programa RHYHABSIM trabaja con celdas unidimensionales. Para hacer el estudio hidrobiológico de un tramo en 1 dimensión, éste se dividirá en transectos, y los transectos en celdas. Cada celda tendrá el valor de velocidad media, longitud, profundidad y sustrato.

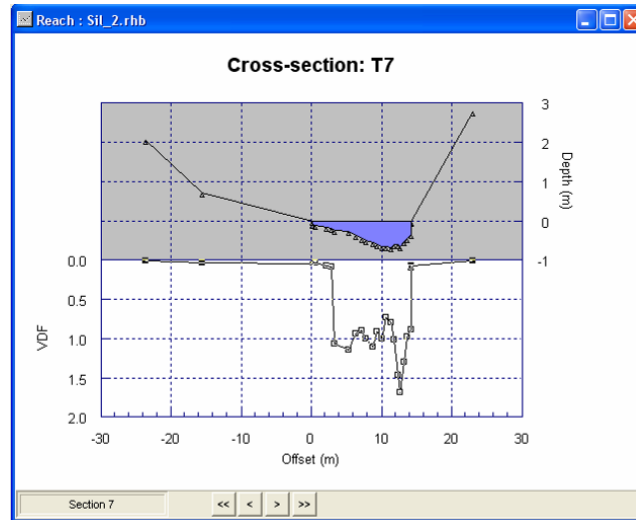


El proceso de calibración y simulación consta básicamente de varias fases, entre las que están:

- Chequeo del archivo de datos de campo. Son muy variados los errores que se pueden cometer, y el programa los chequea o en algunos se pueden chequear con ayuda del mismo. Uno de los errores más importantes que el simulador puede comprobar con las diferentes herramientas que posee el programa (representación de gráficos, como las curvas de gasto de cada transecto...), es que el caudal introducido de la segunda campaña, que tiene, por ejemplo, un caudal menor que en la primera, tenga una lámina de agua con una cota más elevada (segunda campaña con datos “no coherentes”). Suele ocurrir cuando no hay una gran variación de caudales entre una campaña y otra (ocurre en tramos muy regulados, por ejemplo).
- Cálculo del caudal e introducción del caudal de calibración.
- Cálculo y edición de los Factores de Distribución de Velocidad (Velocity Distribution Factors, VDF). Se trata del factor que corrige la velocidad en cada celda, respecto de la velocidad media de la sección. Dicha velocidad media, al simular otros caudales distintos al de calibración, es obtenida a partir de la cota de lámina de agua, que procede de la curva de gasto. También puede manejarse en términos del número de Manning, ya que $V_{sección}/V_{celda} = N_{celda}/N_{sección}$. Como este factor se basa en medidas reales de campo (tanto media como en cada celda), supone el elemento fundamental de calibración de velocidades que distingue a los modelos de simulación del hábitat

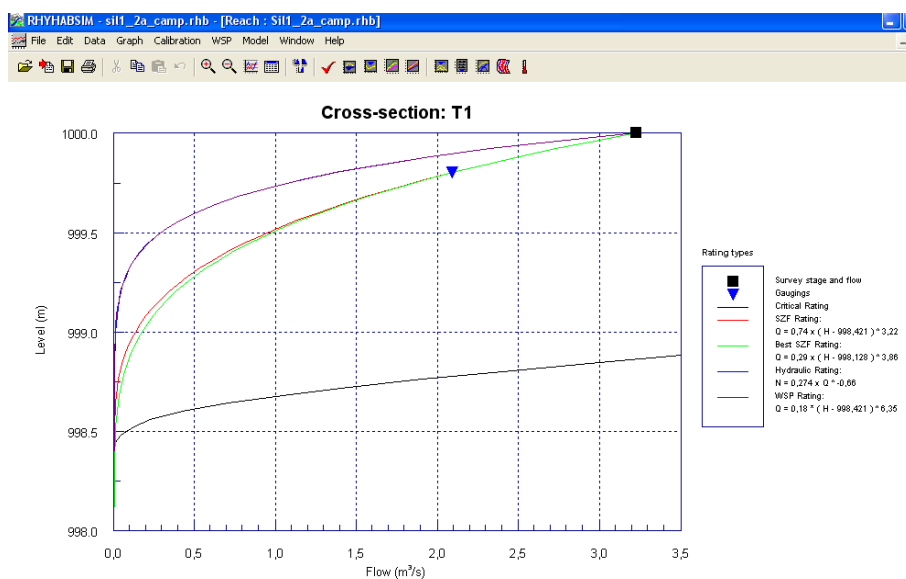
detallados de otros de simulación hidráulica. En consecuencia, el programa aplica este coeficiente de corrección para cada celda cuando calcule las velocidades para distintos caudales. Dicho factor es invariable y no considera variaciones del caudal, ni viscosidad ni transmisión de energía de una celda otra. Por esta y otras razones, la simulación se realiza independientemente con modelos para caudales altos, medios y bajos.

Figura 8. Detalle de la calibración de los VDF's de una sección (transecto)



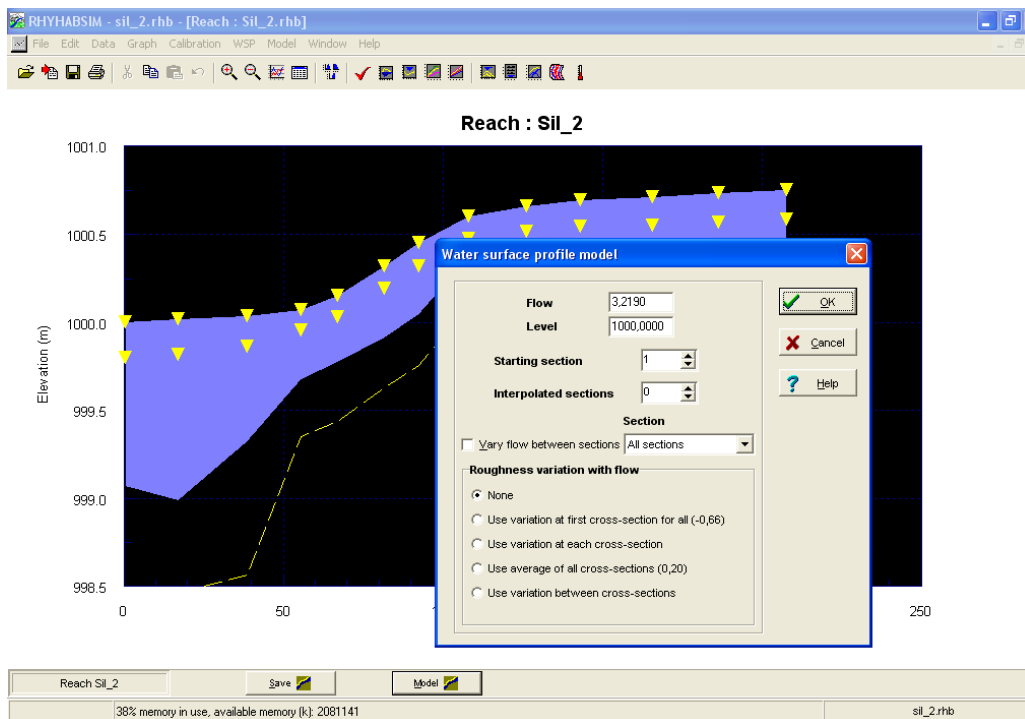
- Cálculo de las distintas curvas de gasto o altura-caudal para cada transecto, que el programa ajusta a los puntos de altura/caudal tomados en las dos campañas de campo realizadas. Estas curvas son la base del modelo hidráulico, ya que cuando se procede a la simulación, lo primero que necesita el programa son estas curvas para saber que altura de agua tenemos con cada caudal.

Figura 9. Detalle de las curvas de gasto de altura-caudal de una sección (transecto)



- Simulación del perfil longitudinal de la lámina de agua (WSP). Se trata de un “subprograma” que calcula el perfil de la lámina de agua a partir de la cota en una sección dada, siguiendo el método hidráulico clásico del paso estándar, del mismo modo que hacen otros programas como HEC-Ras. Permite simular el perfil longitudinal del río para diversos caudales, de modo que genera para cada transecto varios pares de puntos (altura, caudal), con los cuales se puede calcular una curva de gasto. Este método es el menos fiable para obtener la cota de agua en cada transecto, por lo que se ha aplicado sólo en caso de que la segunda campaña de campo no fuera coherente con la primera (por ejemplo, en aquellos casos donde el caudal introducido de la segunda campaña, con, por ejemplo, un caudal menor que en la primera, tenga una lámina de agua con una cota más elevada). El programa calcula un valor N de Manning que podemos llamar “ficticio” ya que corresponde a todos los tipos de pérdidas (continuas y locales) que existen en el cauce entre dos transectos. En el caso de tener que utilizar éste modelo en algún caso excepcional, es necesario volver a calcular después las curvas de gasto, incorporándose un nuevo método de cálculo.

Figura 10. Detalle la Simulación del perfil longitudinal de la lámina de agua



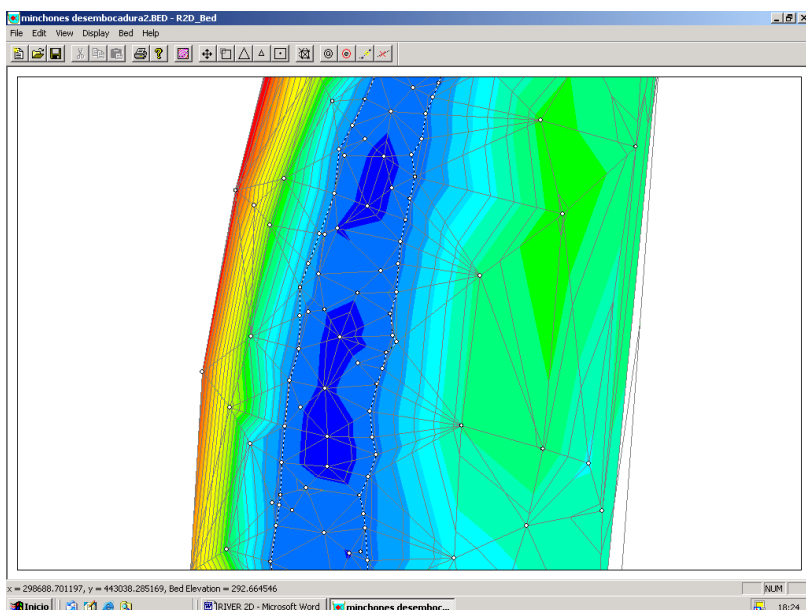
- Selección de curvas de altura-caudal. El programa calcula 4 diferentes curvas de gasto: la de mejor ajuste a los puntos, mejor ajuste pasando por nivel de caudal cero o por sección mínima, curva basada en los puntos generados por simulación del perfil de lámina (WSP), o basada en fórmula de Manning, en caso de haber hecho dos campañas de campo mínimas. En el caso de que tan solo se pudiesen utilizar una campaña de campo, calcula tan solo dos (WSP y Manning).
- Seleccionar curvas de preferencia y obtención de la curva HPU – Q.

Para la SIMULACIÓN HIDRÁULICA BIDIMENSIONAL se ha utilizado el programa River 2D, un paquete informático integrado por cuatro programas con los que se modeliza el ecosistema fluvial sobre el que se va a llevar a cabo el estudio. Estos programas son los siguientes: R2D_BED, R2D_MESH, R2D_ICE (que no ha sido necesaria su utilización en los presentes estudios, ya que es para la simulación de canales fluviales helados) y R2D. A continuación se detallan los pasos a seguir, usando los distintos programas que conforman River 2D:

R2D_BED

Se encarga de la edición de los datos topográficos obtenidos en el campo mediante estación total y GPS; permite principalmente retocar los nodos, crear líneas de rotura y crear un TIN (red irregular de triángulos) como modelo digital de elevaciones del cauce. En cada nodo, además de sus coordenadas, el archivo de datos almacena la rugosidad absoluta especificada en unidades métricas.

Figura 11. Detalle de la topografía representada en el BED

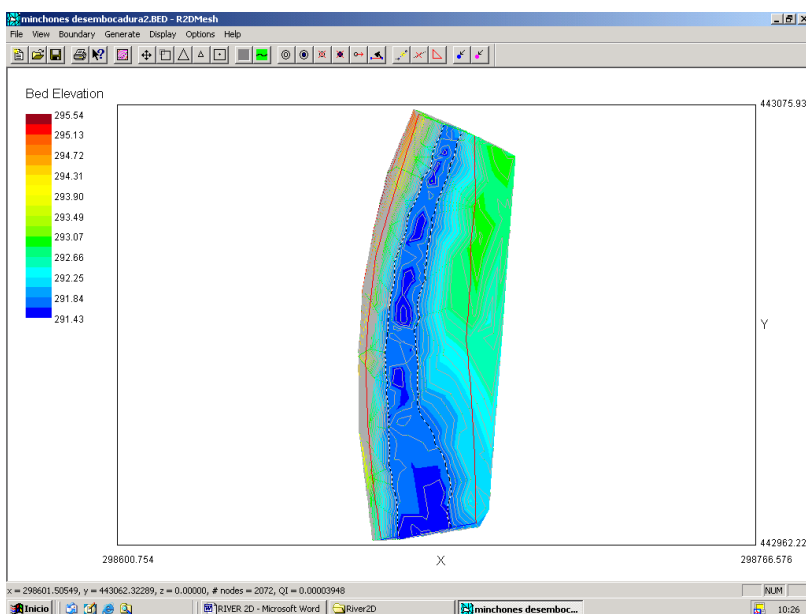


2D_MESH

Donde se ajustará una malla de cálculo computacional a la topografía del lecho fluvial ya obtenida previamente mediante el RIVER BED. La malla también contiene sus propias líneas de rotura y se triangula formando un TIN. Así pues está formada por triángulos que conectan los nodos, entre los cuales las variables de cálculo se interpolan de modo lineal. La malla se ha creado con la densidad adecuada para conseguir un ajuste a la topografía real, manteniendo una calidad de la malla aceptable, que permita obtener soluciones de simulación en pocas horas.

Esta malla constituye la auténtica topografía final que será utilizada en el programa de cálculo por elementos finitos, el RIVER-2D.

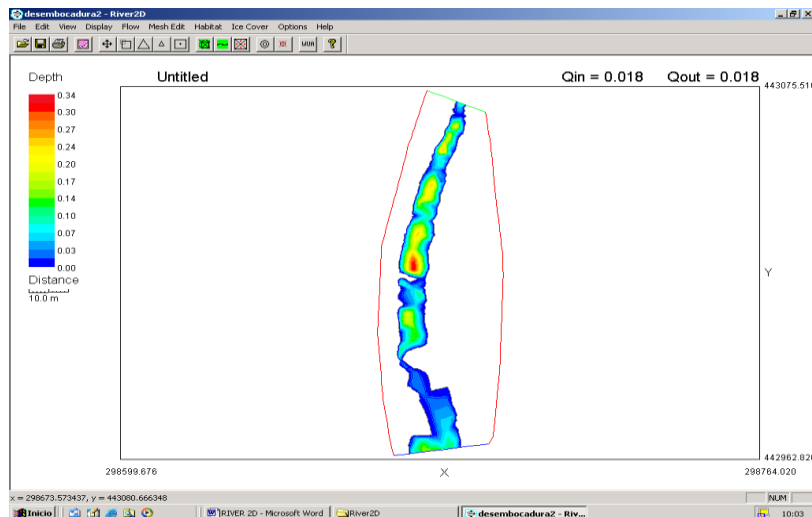
Figura 12. Detalle de la topografía representada en el MESH



RIVER 2D

Es el programa específico de simulación hidráulica y del hábitat en dos dimensiones (basado en la velocidad media de la columna de agua), para determinar mediante metodología IFIM el Hábitat Potencial Útil (WUA).

Figura 13. Detalle del tramo representado en el RIVER 2D



Este modelo se basa en las ecuaciones de Saint Venant expresadas en forma conservativa, expresando en derivadas parciales la conservación de la masa en las dos componentes o direcciones del vector velocidad. Dichas ecuaciones son resueltas por el programa mediante el método de elementos finitos (formulación de residuos ponderados de Petrov-Galerkin). La formulación permite obtener soluciones estables independientemente de que se presenten zonas de flujo subcrítico y supercrítico.

Las variables dependientes en dichas ecuaciones son la profundidad y la velocidad media de la columna de agua en dos direcciones (contenida en el plano horizontal). Este programa considera como hipótesis de cálculo, para promediar las profundidades, que la distribución vertical de presiones sigue una ley hidrostática y que el perfil de velocidades en la columna de agua es aproximadamente uniforme.

Para la calibración del modelo, el programa debe correr y resolver satisfactoriamente los principios hidráulicos sobre los que se apoya. Estas operaciones se realizan nodo a nodo de tal forma que el caudal que se introduce como condición de contorno (caudal en la sección de entrada al tramo) debe coincidir razonablemente (error < a 10⁻⁴) con el calculado por el simulador en la sección de salida.

El éxito de la operación anterior depende lógicamente de la buena definición del modelo digital del terreno y del grado de fidelidad de las estimaciones de caudal así como de las medidas de la altura de la lámina de agua.

La simulación de distintos escenarios provocados por incremento o descenso del caudal circulante requiere los parámetros m y k de la curva de gasto específica del tramo, $q = khm$, donde q es el caudal unitario y h la altura de la lámina. Esta curva de gasto debe ser característica de la sección donde se ha realizado la estimación del caudal, mediante la que se pasaría de la condición fija (en el momento del muestreo) a un modelo en el cual se pueden modificar las condiciones hidráulicas.

La obtención de estos parámetros de la curva se solventa realizando repetidas salidas de campo en las que se realicen aforos del caudal y medidas de la altura de la lámina de agua en el mismo punto del tramo (sección de salida) en distintas épocas del año, obteniéndose los puntos mínimos necesarios en la representación gráfica q/h para el ajuste de la curva. Se han efectuado dos salidas de campo.

Con el simulador hidráulico calibrado, es posible conocer características hidráulicas de cualquier punto del tramo como la profundidad o velocidad de la corriente para cualquier caudal deseado. A partir de aquí, fusionando los conceptos de habitabilidad y de caudal, se generarán las curvas HPU/Q, de la que se obtienen los valores de los caudales mínimos ecológicos.

Como se ha podido apreciar en la anterior descripción, los programas son completamente diferentes, tanto la entrada de datos, como en la calibración y la simulación. Pero ambos utilizan las mismas curvas de idoneidad de las especies con las tres variables de velocidad, profundidad y sustrato (el programa RHYHABSIM también podría funcionar con la variable temperatura).

Como norma general, para los ríos de menor entidad, se ha empleado modelos 1D (en unos pocos casos se han utilizado los modelos 2D), mientras que para aquellos que no han sido vadeables, se ha acudido a un modelo 2D mediante el empleo de una ecosonda que recoge los datos de batimetría acoplada a una embarcación.

En base a la experiencia, se puede afirmar que no existen grandes diferencias en la calidad de los resultados obtenidos mediante modelización con tramos unidimensionales ó bidimensionales.

Selección de especies y curvas empleadas

Una vez que se ha realizado el calibrado del modelo hidráulico, para proceder a la simulación de diferentes caudales y a la obtención de los valores del hábitat potencial útil (HPU ó WUA), es necesario introducir las condiciones de cada uno de los estadios de las especies consideradas en el tramo.

La selección de las especies piscícolas presentes en cada tramo de estudio se ha obtenido en función de la información bibliográfica de la que se ha dispuesto (censos piscícolas, Atlas y Libro Rojo, estudios de caudales ecológicos ya realizados, publicaciones específicas al respecto, etc.)

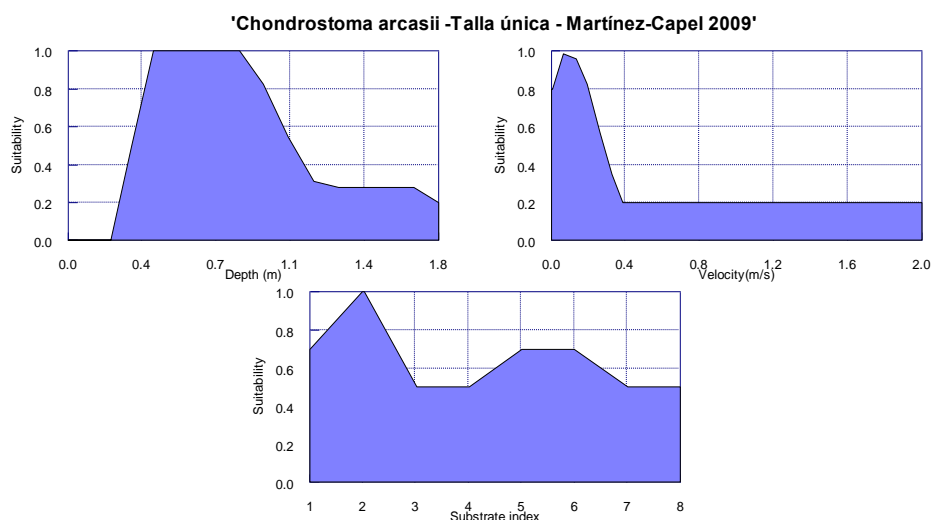
En el momento de inicio de los trabajos para la determinación de los caudales ecológicos, la disponibilidad de curvas de preferencia era reducida.

De esta circunstancia surgió la necesidad de elaboración de curvas de preferencia de varios estadios de las especies objetivo, tarea realizada en el marco de los citados trabajos. Asimismo, se ha procedido a adaptar alguna de las curvas ya existentes, con vistas a posibilitar su utilización.

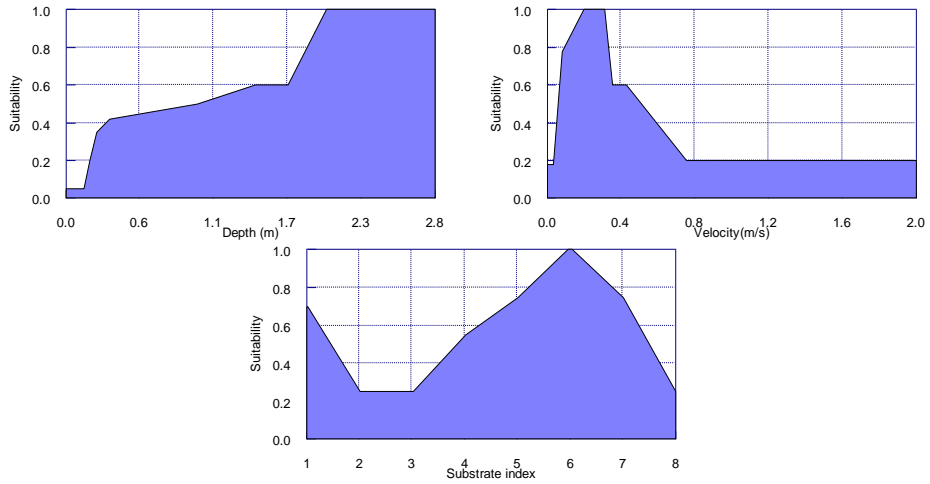
En la siguiente tabla se presentan las especies para las que se ha dispuesto de curvas de preferencia y que han podido ser introducidas en el proceso de simulación.

ESPECIES SIMULADAS	FUENTE DE LA CURVA
Squalius pyrenaicus (Cacho)	Bibliográfica
Barbus bocagei (Barbo común)	Bibliográfica
Chondrostoma arcasii (Bermejuela)	Para este estudio
Chondrostoma duriense (Boga del Duero)	Bibliográfica/para este estudio
Squalius carolitertii (Bordallo)	Bibliográfica/para este estudio
Salmo trutta (Trucha)	Bibliográfica/Para este estudio

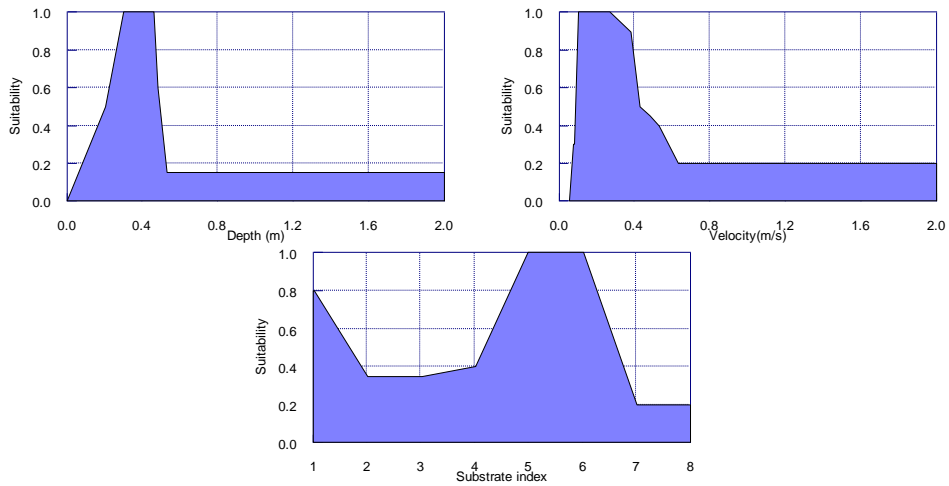
Se presentan a continuación ejemplos de curvas utilizadas en las simulaciones.



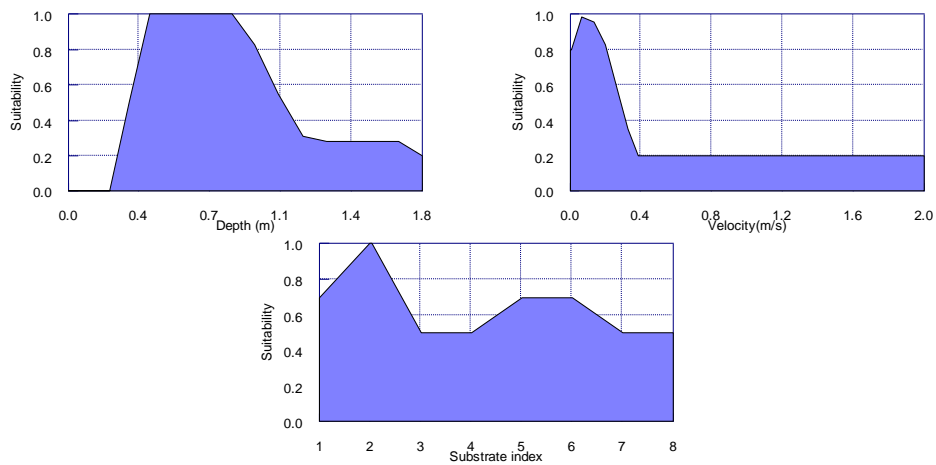
'Barbus bocagei - (7-25cm) JUVENIL - Martínez-Capel 2004'



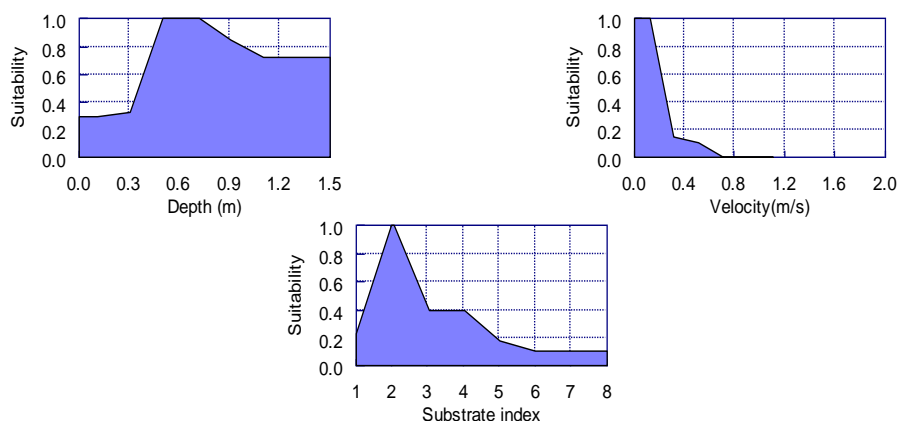
'Barbus bocagei - (<7cm) ALEVIN - Martínez-Capel 2004'



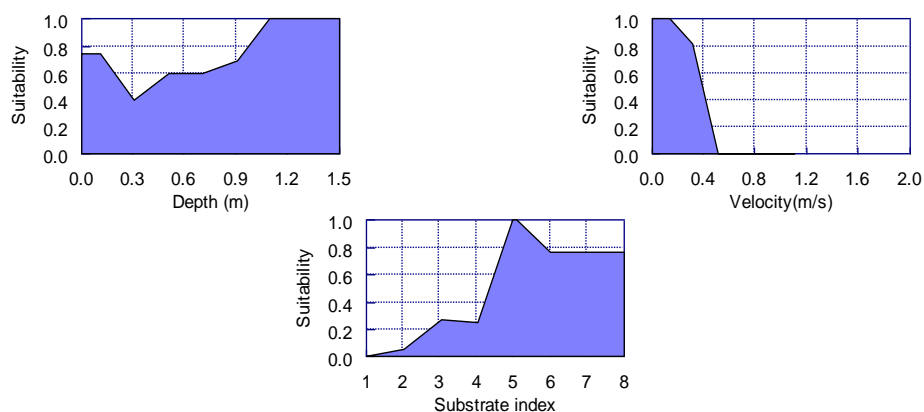
BERMEJUELA AD-JU-AL (Martínez-Capel (2009))



'Squalius carolitertii - (<90mm) ALEVÍN, VERANO-OTOÑO'



'Squalius carolitertii - (>90mm) ADULTO, VERANO-OTOÑO'



Elaboración y utilización de las curvas HPU/Q

Las funciones de idoneidad se determinan para aquellos parámetros directamente ligados a las condiciones hidráulicas: velocidad, profundidad, sustrato, temperatura, refugio... Se presentan en forma de curvas de probabilidad de uso, cuyo pico representa la condición óptima o máxima idoneidad para un determinado parámetro.

Las curvas de preferencia de la fauna son distintas para cada estadio del ciclo vital de los peces, siendo posible analizar el grado de adecuación de las condiciones hidrológicas para un mismo pez en sus etapas de freza, alevín, juvenil y adulto. De igual forma, las exigencias de hábitat y de caudales circulantes por parte de los peces y de las comunidades reófilas no son las mismas a lo largo de las diferentes estaciones, sino que existen temporadas críticas en las cuales estas exigencias se hacen más perentorias por ejemplo en los períodos de freza y de desarrollo de los embriones.

Tradicionalmente, a escala local de un determinado tramo de un río (microhábitat) son modeladas tres variables abióticas clave, que son con las que posteriormente se hacen las “curvas de idoneidad”, para el cálculo de las curvas HPU-Q:

- La velocidad media de la columna de agua, que básicamente aporta información sobre el gasto bioenergético necesario por los individuos durante la natación y la búsqueda de alimento.
- La profundidad relacionada con la penetración de la luz y con la predación (por su valor como refugio, según sea la turbidez).
- Sustrato: tiene influencia en la calidad de los frezaderos, la producción de invertebrados y las oportunidades de refugio.

La valoración de cada microhábitat, en un modelo del hábitat acuático, se realiza a través de índices de idoneidad. Se trata de un valor entre 0 y 1, que puede corresponder a una sola o a varias variables en conjunto, según los métodos de cálculo utilizados. Para cada microhábitat, en función de las variables

escogidas, se calcula un índice combinado de calidad o idoneidad. Los índices de cada variable pueden proceder de funciones binarias y curvas de idoneidad, pero también pueden utilizarse funciones multivariantes obtenidas por modelos estadísticos. Para la definición de la especie objetivo se ha efectuado un análisis inicial para los distintos estadios de cada una de las especies a simular y otro posterior con los estadios restrictivos obtenidos para cada especie, de tal forma que se obtiene el estadio y especie objetivo como aquel que requiere mayor caudal para un mismo porcentaje de su habitabilidad.

Se define el Hábitat Potencial Útil (HPU) como el equivalente al porcentaje del hábitat, expresado como superficie del cauce inundado o como anchura por unidad de longitud de río, que puede ser potencialmente utilizado con una preferencia máxima por una población o una comunidad fluvial.

El Hábitat Potencial Útil se expresa en Superficie Potencial Útil, calculada al multiplicar el Índice Combinado de idoneidad por la Superficie real de cada unidad en la que se ha dividido el río:

$$\text{HPU} = \text{ICi} \cdot \text{Sreal}$$

A escala de tramo para un caudal dado, el índice cuantitativo para valorar el hábitat disponible es el Hábitat Potencial Útil (HPU) o Área Ponderada Útil (Weighted Usable Area), cuando el modelo del medio acuático se desarrolla en 1 dimensión o en 2 dimensiones, respectivamente.

El valor potencial del hábitat fluvial es pues la apetencia de la especie acuática para cada uno de los posibles segmentos fluviales o nodos simulados en los modelos hidráulicos. Esta preferencia se obtiene a partir de la combinación de tres parámetros, definidos a su vez por tres índices: la velocidad (Ivel), la profundidad (Iprof) y la composición del sustrato (Iprof). La idoneidad por una determinada velocidad, profundidad o sustrato están tabuladas en función del caudal para los estadios de las especies a estudiar.

El Índice Combinado de idoneidad (ICi) puede relacionarse con los tres índices parciales por alguna de las fórmulas siguientes (multiplicativa o geométrica respectivamente).

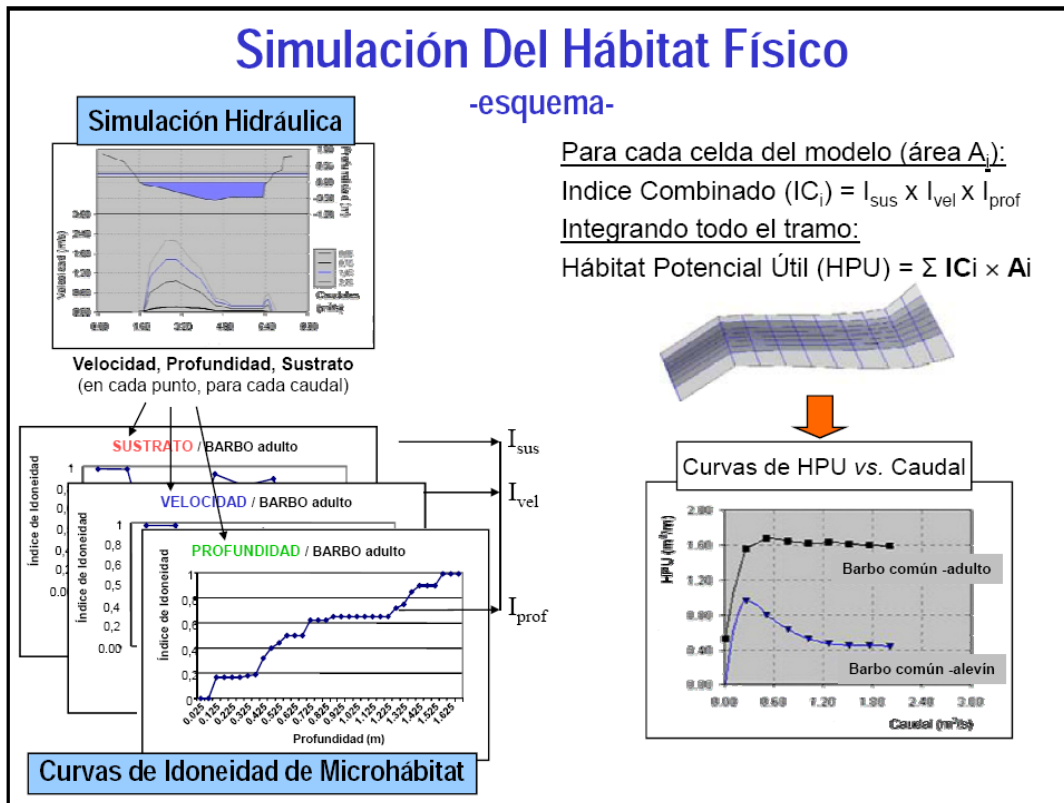
$$\text{ICi} = (\text{Cv} \cdot \text{Ch} \cdot \text{Cs});$$

$$\text{ICi} = (\text{Cv} \cdot \text{Ch} \cdot \text{Cs})^{1/3}$$

El estudio del Hábitat Potencial Útil permite conocer las posibilidades de uso del río por parte de la especie o especies consideradas, en función de las características de la corriente y a medida que va variando el caudal. Se trata de establecer una combinación de condiciones hidráulicas (velocidad y profundidad) y características del cauce (sustrato y cobertura), óptimas para cada especie y estado de vida. Con la información del tramo de río recogida en el desarrollo del modelo hidráulico y en la puesta a punto de las curvas de preferencia, se dispone de una serie de datos sobre la profundidad, velocidad, tipo de sustrato y cobertura, así como su distribución longitudinal y transversal en el río.

Dicho de otra forma, utilizando el modelo de simulación hidráulica se pueden estimar las condiciones de los distintos parámetros en cada celda bajo un caudal diferente, y con ellas volver a calcular el HPU con ese caudal. Realizando este cálculo para distintos caudales se obtendrán relaciones numéricas que permiten conocer como evoluciona el HPU en función del régimen de caudales, que constituyen las curvas HPU/Q.

Así, se han desarrollado curvas HPU/Q (Hábitat Potencial Útil/Caudal), a partir de las simulaciones de idoneidad del hábitat para los distintos estadios fisiológicos de cada especie de la que se ha dispuesto de curvas de preferencia, o de los que se han construido curvas de preferencia.



A continuación, se muestran dos ejemplos de curvas HPU/Q, usando como especie objeto la trucha común.

Figura 14. Ejemplo Curvas HPU/Q para un río modelo

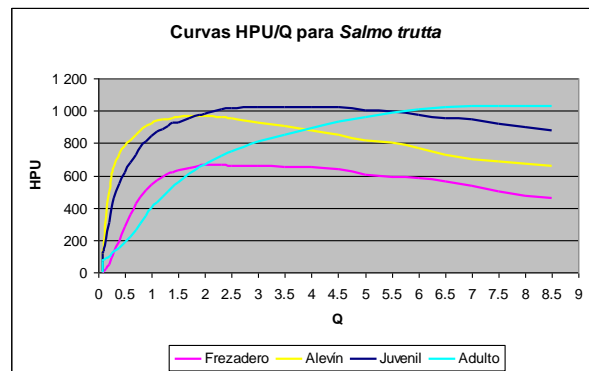
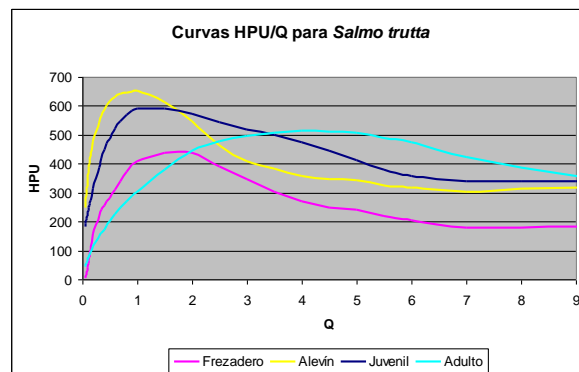


Figura 15. Ejemplo Curvas HPU/Q para otro cauce



2.1.3. Resultados hidrobiológicos

El resultado hidrobiológico deriva de la determinación, entre las especies y estadios autóctonos del tramo, de cuál es la que mayor caudal requiere para lograr su óptimo de habitabilidad.

Debido a la gran disparidad de demandas de caudal existente, tanto entre tallas de una misma especie como entre diferentes individuos, se debe relativizar los valores absolutos de HPU (m²) con el fin de establecer un criterio unificador, que equipare todos los óptimos de habitabilidad de las especies y estadios, en el caso que las curvas de HPU/Q no presenten máximo (ni cambio significativo de pendiente), y este haya que establecerlo a un determinado percentil de la serie de caudales medios diarios.

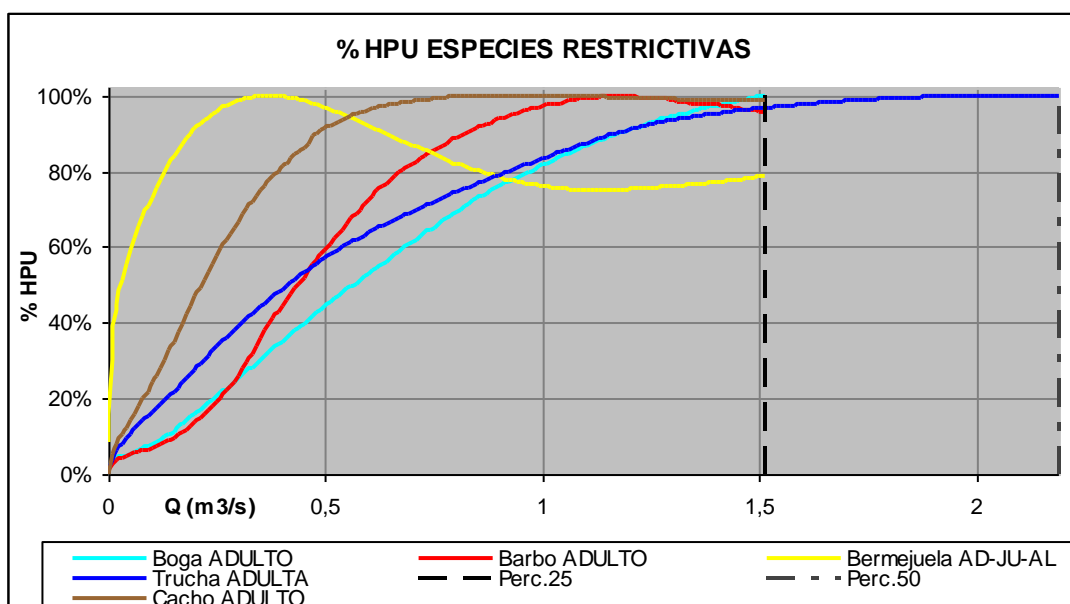
Así, y haciendo referencia a esto último, la Instrucción de Planificación Hidrológica, establece en su punto 3.4.1.4.1.1.3. lo siguiente:

“En el caso de que la curva de hábitat potencial sea creciente y sin aparentes máximos, podrá adoptarse como valor máximo el hábitat potencial útil correspondiente al caudal definido por el rango de percentiles 10-25% de los caudales medios diarios en régimen natural, obtenido de una serie hidrológica representativa de, al menos, 20 años.”

Con este fin, en todas las curvas de hábitat se relativizará el HPU (m²) respecto del máximo de habitabilidad; fijándose éste, en el óptimo marcado por la curva o en el percentil 25% de la serie corta de caudales medios diarios (se opta por el umbral superior que permite la Instrucción, para poder realizar una mejor evaluación de la evolución de la curva, como ya se explicará más adelante en el apartado de toma de decisiones y conocimiento de la metodología).

Así en la gráfica inferior, se muestra cómo relativizando el máximo de HPU (m²) a percentil 25% en la curva de la boga adulta (sin máximo de habitabilidad), permite comparar las demandas de caudal de ésta respecto a los máximos absolutos de habitabilidad del resto de las especies que sí los presentan.

Figura 16. Ejemplo de curvas de %HPU/Q de las especies y estadios más restrictivos de un tramo.



Como se puede apreciar, la gráfica únicamente muestra el estadio más restrictivo de cada una de las especies presentes en el tramo simulado. Ello implica, que el resto de tallas no presentes, no demandan tanto caudal para alcanzar su óptimo (ya sea absoluto o relativo) y que por tanto, asegurando una habitabilidad adecuada para la talla más restrictiva, se garantizará un caudal más que aceptable para el resto de estadios de la especie.

Tabla 1. Relación de caudales demandados por las especies más restrictivas, en función del % de HPU requerido.

ESTADIO	BOGA ADULTA	BARBO ADULTO	BERMEJUELA ADULTA	TRUCHA ADULTA	CACHO ADULTO
Q 100%	1,980	1,140	0,360	2,010	0,920
Q 80%	1,052	0,674	0,130	0,921	0,391
Q 50%	0,597	0,437	0,028	0,413	0,215
Q 30%	0,364	0,322	0,008	0,219	0,128
Q 25%	0,310	0,294	0,006	0,178	0,104

Para el ejemplo mostrado en la tabla superior, se verifica que la especie y estadio objetivo del tramo es la boga adulta; ya que para los caudales que demanda ésta a cualquier porcentaje de HPU, se va a garantizar un porcentaje de habitabilidad superior a éste para el resto de especies.

Así, para la obtención de resultados se considerará como objetivo aquella especie autóctona y estadio presente en el tramo con mayor requerimiento de caudal, o en el caso de ser un estadio que sólo esté presente en una época del año (será la especie más restrictiva, pero no la objetivo), se ha optado por buscar otro que no sobredimensione la necesidad de recurso en el periodo de año que no está presente el primero, pero que la adopción del segundo no suponga una disminución drástica de su habitabilidad.

Posteriormente como resultado hidrobiológico preliminar, se ha considerado el caudal correspondiente a un umbral del hábitat potencial útil comprendido en el rango 50-80% del hábitat potencial útil máximo, tal y como dicta la IPH, calculándose también el 30% del HPU, para aquellos tramos muy alterados hidrológicamente.

Para la consideración de los máximos de HPU (m2), o la desestimación de los mismos se ha seguido, en todo caso, el resto de criterios contemplados en la Instrucción de Planificación Hidrológica:

En aquellos tramos en los que las especies presenten máximos en sus curvas, se han asumido dichos máximos, siempre que el valor de caudal al que vayan asociados sea coherente con los datos hidrológicos. En otras palabras, aquellos que se encuentre dentro de un rango de caudales que puedan ser asumidos de forma natural por el tramo.

En los casos en los que ha entendido necesario (debido al impedimento que realiza la Instrucción respecto a que se debe tomar un valor único y no un umbral de caudales), se han estudiado también puntos concretos en las curvas HPU/Q, en las que en un determinado caudal se produzca un cambio significativo de pendiente.

En cualquier caso, el resultado hidrobiológico definitivo, se ha obtenido tras una comparación de los valores de %HPU-Q con los resultados obtenidos con el método hidrológico, así como otras consideraciones que aquí se resumen:

- Grado de alterabilidad.
- Cumplimiento de probabilidades mensuales.
- Presencia estacional de los estadios más restrictivos.
- Porcentajes de habitabilidad y percentil-caudal asociado.

Hay que indicar que cuando se han comparado los datos hidrológicos con los hidrobiológicos, al no coincidir en muchas ocasiones el punto de campo donde se han llevado a cabo los trabajos con el final de masa donde se ha estimado la serie natural, se ha realizado un nuevo hidrológico adaptado al punto de campo con el fin de poder conseguir unas buenas correlaciones e interpretaciones de los resultados.

Aunque en algunos casos este trabajo pudiera ser prescindible (ubicación del punto de campo cerca del fin de masa o masas con cuencas vertientes muy pequeñas), en otros se considera fundamental, pues se trataba de masas con tributarios que dependiendo de la ubicación del punto de toma de datos en campo para la simulación, las aportaciones en dicho punto y en final de masa pueden tener un amplio margen de diferencia que puede dar al traste con una buena relación o toma de decisiones entre los datos hidrológicos e hidrobiológicos.

Además se entiende que disponer de un hidrológico en el punto de campo que se relacionará con el hidrobiológico en la misma ubicación, posibilita extrapolar el dato a otros posibles puntos de la masa en los que se tenga hidrológico, como al final de la misma e incluso a otras masas del mismo cauce.

2.2. Distribución temporal de caudales máximos

Con el fin de limitar los caudales circulantes y proteger así a las especies autóctonas y estadios más vulnerables, se han definido unos caudales máximos que no deben ser superados en la gestión ordinaria de las infraestructuras hidráulicas.

Los caudales artificialmente altos y continuados pueden reducir las poblaciones piscícolas de los estadios y especies más sensibles por agotamiento al superar las velocidades críticas, produciendo su desplazamiento hacia aguas abajo o incluso su muerte. Es recomendable durante la gestión ordinaria no superar las velocidades críticas (V_{crit}) o velocidad de agotamiento, asegurando el mantenimiento de unas condiciones medias en el medio fluvial asimilables a las velocidades óptimas de desplazamiento (velocidades a las que el pez es capaz de desplazarse grandes distancias manteniendo un coste energético de desplazamiento mínimo).

Para el estudio de los caudales máximos se han seguido las instrucciones de la IPH, y la metodología expuesta en el apartado “3.2 Distribución Temporal de Caudales Máximos” de la “Guía para la Determinación del Régimen de Caudales” (GEC-ver. 0.7). Siguiendo las Instrucciones de la IPH, el régimen máximo de caudales máximos se ha verificado mediante el uso de los modelos hidrobiológicos, 1D ó 2D, de

forma que se garantice tanto una adecuada existencia de refugio para los estadios o especies más sensibles como el mantenimiento de la conectividad longitudinal del tramo.

2.2.1. Capacidad natatoria de la ictiofauna

Es preciso considerar las capacidades natatorias de los distintos estadios objetivos piscícolas durante cada hidroperiodo. Para ello se han seguido los criterios que sobre velocidades son mencionados en el documento “Guía para la Determinación de Caudales Ecológicos (GEC-ver. 0.7)”.

Según la misma, “Para la definición de las velocidades óptimas se deberá recurrir a la recopilación de información científica específica para las especies objetivo seleccionadas en el tramo, a su generación específica por consulta a expertos o bien recurrir al análisis de envolventes de curvas de preferencia. En caso de carecer de información deberá recurrirse a los umbrales de velocidades críticas definidas en la Instrucción”.

Se ha recurrido a expertos y se ha buscado en la bibliografía información sobre las velocidades máximas que pueden soportar las diferentes especies, pero es muy poca y dispersa la información existente al respecto, por lo que se ha decidido tomar como intervalos limitantes de velocidad máximas las propuestas en la IPH:

- Alevines: 0.5- 1 m/s

- Juveniles: 1.5-2 m/s

- Adultos : < 2.5 m/s

2.2.2. Procedimiento para la determinación de los caudales máximos

El procedimiento seguido para la distribución del régimen de caudales máximos, consta de una caracterización hidrológica del tramo, y una posterior verificación de que dicho percentil (caudal) garantiza el refugio para los estadios/especies más restrictivos y también la conectividad de tramo, mediante los modelos hidráulicos asociados a los modelos de hábitat.

Caracterización hidrológica del tramo

Según lo expuesto en la IPH, la caracterización de los caudales máximos se realizará analizando los percentiles de excedencia mensuales de una serie representativa de caudales en régimen natural de al menos 20 años de duración. Para la caracterización hidrológica de la distribución temporal de caudales máximos se han calculado los percentiles 90% de los meses correspondientes a los años húmedos, para la serie larga (1940/41-2005/06) de caudales a régimen natural, con el fin de validar un caudal suficientemente alto que permita incluir y validar todos los inferiores a éste.

Para ello, se ha hecho un estudio de años húmedos que, según lo que considera el IAHRIS, son aquellos años que tengan un percentil superior al 75% de la media anual, sobre la serie larga de caudales.

Posteriormente, se ha calculado el P90 con los datos mensuales de los años húmedos, con el fin de garantizar el cumplimiento de los requisitos buscados a cualquier caudal menor. A este respecto la IPH recomienda no utilizar percentiles superiores al 90% de excedencia de una serie de caudales naturales mensuales representativa, de al menos 20 años.

Se debe subrayar que la IPH considera que hay que calcular los caudales máximos en “dos periodos hidrológicos homogéneos y representativos, correspondientes al periodo húmedo y seco del año”. Después de las reuniones mantenidas con la dirección de los proyectos para la puesta en común de la metodología, se ha llegado a la conclusión de que los hidroperiodos serán bioperiodos, marcados por el estadio más restrictivo, ya que no es lógico proponer una restricción hidrológica si el estadio en cuestión es capaz de soportar las velocidades que se dan para ciertos caudales. Por lo tanto, se ha propuesto una distribución mensual de caudales máximos, limitados por la biología de las especies consideradas en los tramos.

Según la misma “Este régimen máximo de caudales máximos deberá ser verificado mediante el uso de los modelos hidráulicos asociados a los modelos de hábitat, de forma que se garantice tanto una adecuada existencia de refugio para los estadios o especies más sensibles como el mantenimiento de la conectividad del tramo.” Por lo tanto, en los siguientes apartados se procederá a la verificación mediante el modelo hidráulico, siguiendo la metodología expuesta en la Guía de Caudales ecológicos.

Evaluación del hábitat de refugio

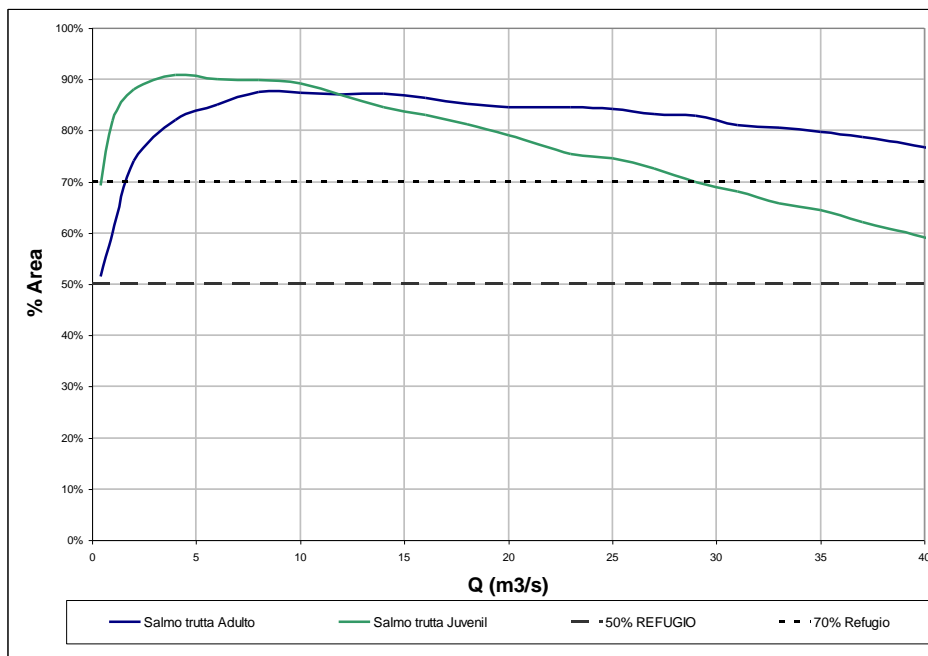
Se define como refugio aquellas zonas del río con una determinada profundidad mínima de agua y cuyas velocidades no superan las velocidades máximas para las especies existentes en el tramo. Para ello, se han considerado los intervalos limitantes de velocidades máximas propuestos en la IPH:

ESTADIO	VELOCIDAD LIMITANTE	PROFUNDIDAD LIMITANTE
Alevín	< 1	> 0,1
Juvenil	< 2	> 0,15

Adulto	< 2,5	> 0,25
--------	-------	--------

Se ha hecho un análisis espacial de la distribución de velocidades, analizando el porcentaje de superficie mojada del tramo que supera las velocidades óptimas con los programas de simulación en 1 dimensión y en 2 dimensiones, obteniendo el porcentaje de superficie de refugio sobre el total de la superficie mojada del tramo, representándose en una gráfica el % refugio frente a los caudales simulados.

A continuación se presenta un ejemplo de un tramo de simulación de área utilizada como refugio:



Como puede observarse en la gráfica anterior, el juvenil es el estadio más restrictivo y el único en el que disminuye el % de refugio sobre el total de la superficie mojada.

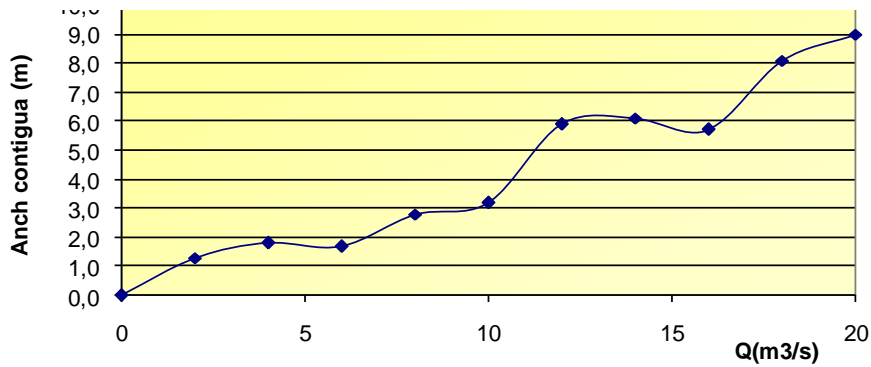
Para aquellos caudales que proporcionan un refugio por debajo del 70% de la superficie mojada del tramo se ha comprobado la existencia/inexistencia de conectividad en el tramo, ya que según la “Guía para la Determinación de Caudales Ecológicos”, en su apartado de Caudales máximos “Como buena práctica, se deberá asegurar que al menos se mantenga un 50% de la superficie mojada del tramo como refugio en las épocas de predominancia de los estadios más sensibles con el fin de aplicar el principio de precaución y situarnos del lado de la seguridad. Cuando la superficie mojada que supera las velocidades óptimas supera el 30% de la superficie del tramo (refugio inferior al 70% de la superficie) será necesario analizar las condiciones de conectividad y la capacidad de refugio del tramo”.

Evaluación de la conectividad

Para el cálculo de la conectividad se ha recurrido a los programas de simulación, obteniendo dos presentaciones de resultados diferentes, según se trate de simulación en una dimensión o en dos dimensiones.

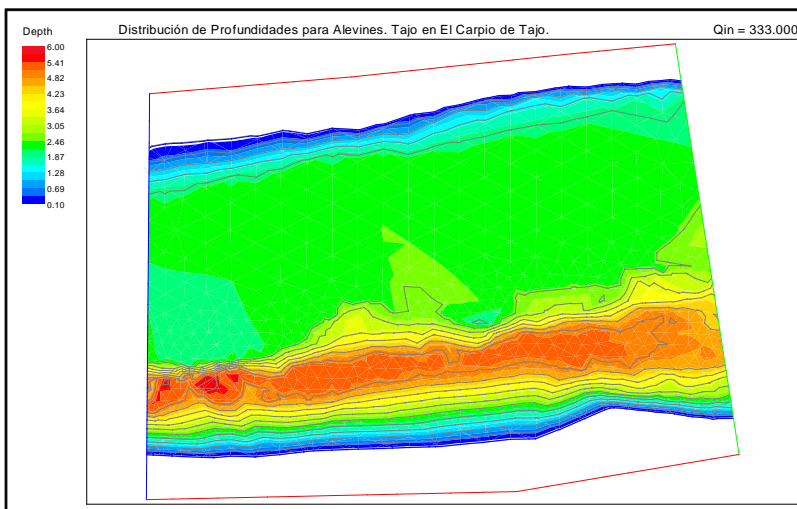
En el caso de tramos unidimensionales, el programa reproduce una gráfica de anchura de paso-caudal contigua, donde se muestra la mínima anchura de paso existente para cada caudal. El análisis de esta gráfica se ha utilizado para la comprobación de si un caudal es suficiente para producir una conexión de hábitats para los peces (considerando las variables de velocidad y de profundidad). Se ha considerado, por estudios consultados previamente, que a partir de un valor de 0.25 m de anchura de paso ya existe conectividad de hábitats en el tramo.

A continuación se presenta un ejemplo de gráfica de anchura de paso-caudal para un tramo unidimensional:

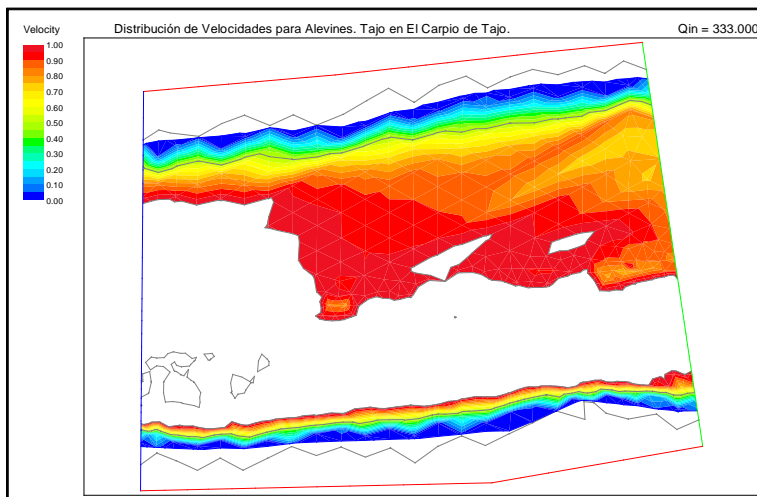


En el caso de tramos bidimensionales, se ha observado espacialmente si existe o no conectividad, y para qué caudal se rompe, como se puede observar en el ejemplo que se muestra a continuación, solapando las capas de velocidad/profundidad:

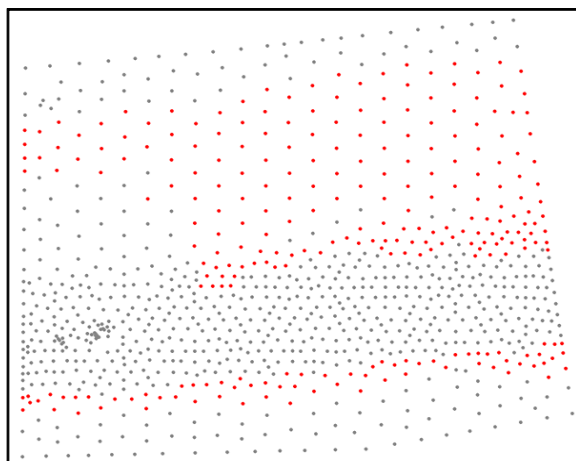
Resultados Q / Conectividad contigua ALEVIN



En colores se representa la distribución de la superficie con profundidades superiores a 0.10 cm, límite establecido para permitir la vida piscícola de alevines, quedando en blanco las zonas no aptas para el alevín.



En colores se representa la distribución de la superficie con velocidades inferiores a 1m/s, límite establecido por la IPH para permitir la vida piscícola de alevines, quedando en blanco las áreas con velocidades superiores a 1m/s.



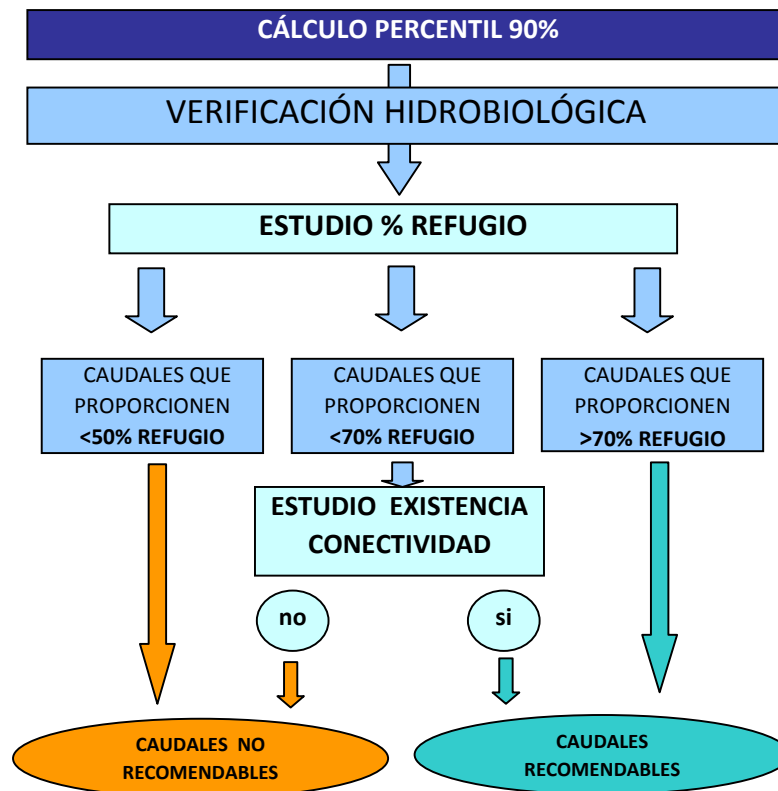
Al fusionar las capas de velocidad y profundidad con las restricciones impuestas para los alevines, se obtiene la imagen que muestra en rojo la distribución de zonas de refugio, permitiendo visualizar la existencia de conectividad en el tramo.

Distribución mensual del régimen de caudales máximos

Para la verificación y el reparto del caudal mensual se han tenido en cuenta los estadios de las especies presentes en el tramo. Para ello se han caracterizado los tramos como salmonícolas, ciprinícolas o ambos, y se ha seguido el siguiente esquema, que está dentro de la “Guía para la Determinación del Régimen de Caudales Ecológicos”, en el apartado 3.1.2.3. *Periodos biológicamente significativos*:

	OTOÑO			INVIERNO			PRIMAVER			VERANO		
Mes	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO
Grupo y Etapa Vital												
CP - Alevines	X								X	X	X	X
CP - Juveniles		X	X	X	X	X	X	X				
CP - Adultos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SL - Alevín						X	X	X	X			
SL - Juvenil							X	X	X	X	X	X
SL - Adulta	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SL - Freza			X	X	X	X						

Por lo tanto, se comprobará, según los estadios de las especies presentes en el tramo de estudio que se cumplen las condiciones de refugio y de conectividad del tramo, y a partir de qué caudal se rompen, y para qué estadio, siguiendo el siguiente esquema:



Se trata por tanto de comprobar a partir de qué caudal el % de refugio está por debajo del 70% sobre la superficie mojada total del tramo, y para qué estadios se rompe. En el momento en el que el refugio esté por debajo del 50%, ya se han considerado como caudales no recomendables en ese tramo, aunque existiese conectividad. Puede ocurrir, por ejemplo, que disminuya el refugio del 50% sobre el total de la superficie mojada para las condiciones del estadio adulto (de ciprínido o de salmónido), por lo tanto no se podrá superar dicho caudal ningún mes, ya que el estadio adulto está presente durante todo el año.

Normalmente es el estadio alevín el más restrictivo debido al aumento de las velocidades con el caudal. En éste caso, dependiendo de si el tramo es ciprinícola o salmonícola, la restricción de dicho caudal será en épocas diferentes, como se ha mostrado en la tabla anterior. Mientras que para los salmónidos la restricción ocurre de febrero a mayo, el de los ciprínidos tendría lugar en los meses de mayo a septiembre.

En el caso de que el refugio esté comprendido entre el 50% y el 70% del total de la superficie mojada del tramo, se ha comprobado la conectividad del tramo. En el momento en el que la conectividad se rompía con un determinado caudal, se consideraba que no era recomendable superar ese caudal, en los meses en los que el estadio en concreto estaba presente. En el caso de que la conectividad no se rompiese para ninguno de los estadios de las especies, y siguiese dentro de los rangos entre el 50% y el 70% de la totalidad de la superficie mojada del tramo, ese caudal sí es recomendable.

2.3. Tasa de cambio y régimen de crecidas

En el estudio se ha considerado la tasa de cambio asociada a los eventos generadores (régimen de crecidas)

No se ha considerado tasa de cambio alguna en la variación temporal de los caudales mínimos entre meses o periodos de factor de variación distintos, ni horarias para la implementación de los caudales máximos.

2.3.1. Caracterización del régimen de crecidas

En la “Guía para la Determinación del Régimen de Caudales Ecológicos”, el caudal generador se asimila al caudal de sección llena o nivel de cauce ordinario (bankfull) o, en su defecto, por la Máxima Crecida Ordinaria (M.C.O.).

La M.C.O. es definida por la Ley de Aguas (RDL 1/2001, 20 de julio) como el caudal que conforma el cauce; y se obtiene, según el estudio “Aspectos Prácticos de Definición de la Máxima Crecida Ordinaria” del CEDEX, en base a la serie de máximos caudales medios diarios en régimen natural.

Los parámetros a determinar para caracterizar el régimen de crecidas en una determinada masa de agua son los siguientes:

- Frecuencia

- Magnitud
- Tasas de cambio
- Duración
- Estacionalidad

Frecuencia

Para determinar la periodicidad de los eventos generadores, se ha partido de la regionalización dispuesta por el CEDEX en la que asigna un coeficiente de variación (Cv) según la zona estudiada, tal como muestra la figura adjunta:

Figura 17. Coeficientes de variación del CEDEX



El período de retorno (T) de la MCO se ha estimado a partir del coeficiente de variación determinado por el CEDEX a partir de la expresión: $T \text{ MCO (años)} = 5 * C_v$

2.3.2. Magnitud

La magnitud del caudal generador se ha calculado por tres métodos diferentes:

Los dos primeros en realidad son el mismo pero con diferentes datos de partida, ajustando los máximos anuales a una distribución Gumbel, utilizando por un lado los caudales de entrada al embalse, suponiendo que estos son prácticamente naturales y por otro la restitución a nivel diario de la modelación de las aportaciones realizada por el CEDEX con el modelo SIMPA.

El método de Gumbel es útil para generar, como resultado final después de su aplicación en un hidrograma unitario para un período de retorno determinado, datos de caudales en las corrientes superficiales que atraviesa una vía durante su trayecto. El Método de Gumbel permite así mismo, a partir de una serie de registros históricos de caudal, predecir la frecuencia y el valor correspondiente de caudal por fuera del rango histórico registrado.

De cada una de las series utilizadas se han obtenido los caudales máximos anuales y se han calculado los estadísticos: media, desviación estándar y número de años de la serie. Estos datos junto con el periodo de retorno, son suficientes para el cálculo del caudal generador.

El método propuesto por el CEDEX en el mapa de caudales máximos se sintetiza más adelante. Para más detalles puede consultarse en la memoria de su aplicación:

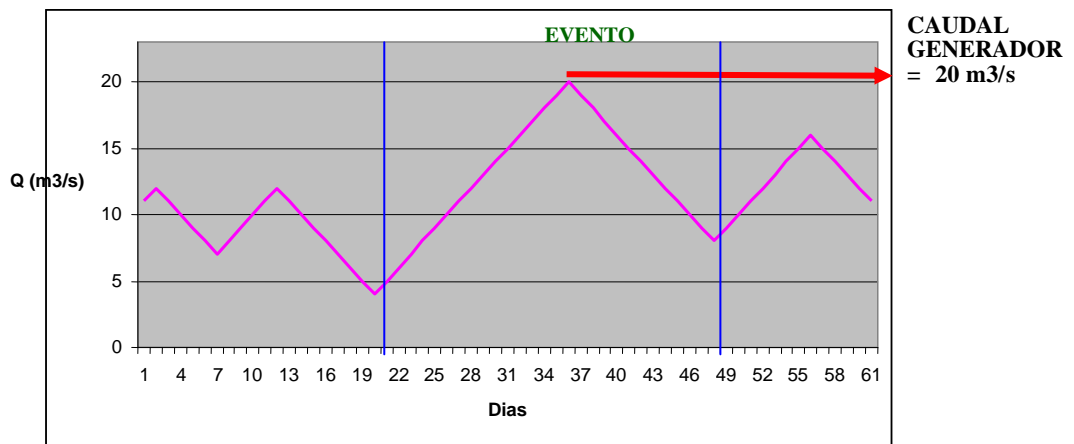
<http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/snczi/mapa-de-caudales-maximos/>

El cálculo en los tres casos se ha realizado partiendo del periodo de retorno calculado por el CEDEX para el mapa de caudales máximos.

2.3.3. Número de eventos a estudiar

Se ha analizado los n/T eventos con caudal punta más próximo al Q_{gen} (tanto por encima como por debajo del mismo) de entre todos los episodios de avenida identificados a lo largo de los n años de la serie de caudales.

Figura 18. Selección de eventos



2.3.4. Tasas de cambio

Se han diseñado unas tasas de cambio basadas en el método del Caudal Básico de Mantenimiento, también conocido como QBM o método de Palau (en la versión de 1999), además de establecer caudales mínimos establece también caudales de crecida y unas tasas de cambio suavizadas según una curva logística.

De forma resumida las fórmulas aplicadas son las siguientes:

Rama ascendente

$$Q_t = \frac{Q_f}{1 + e^{a-rt}}$$

Rama descendente¹

$$Q_t = \frac{Q_f}{1 + e^{rt-a}}$$

Siendo:

$$a = \ln\left(\frac{Q_f}{Q_0} - 1\right)$$

$$r = \frac{a - \ln\left(\frac{1}{b} - 1\right)}{T_{total}}$$

¹ No aparece en la Tesis de J Alcázar, pero sí en publicaciones anteriores.

El número de escalones se ha extrapolado de las siguientes tablas:

Tabla 2. Número de escalones y tiempo mínimo a utilizar en la fase de ascenso en función de la diferencia entre el caudal más bajo y el más alto, elaborada para el caso del Genil

Diferencia de caudal (m ³ /s)	Nº escalones	Tiempo mínimo (min)
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 3. Número de escalones y tiempo mínimo a utilizar en la fase de descenso en función de la diferencia entre el caudal más bajo y el más alto, elaborada para el caso del Genil

Diferencia de caudal (m ³ /s)	Nº escalones	Tiempo mínimo (min)
10	5	30
20	7	35
40	9	45
60	11	55
80	12	60
100	14	70
120	16	80
140	21	105

Para cada uno de los caudales generadores propuestos se han diseñado unas tasas de cambio, utilizando tres tiempos por escalón, 10, 15 y 20 minutos (la duración mínima propuesta en el método es de 5-10 minutos por escalón). Como caudal basal se ha utilizado el caudal ecológico más bajo de los meses de la estacionalidad propuesta (ver más abajo). Los escalones y resultados se presentan a continuación:

2.3.5. Duración del evento

Viene definida por la tasas de ascenso y descenso, desde el caudal base hasta el Qgen y viceversa.

2.3.6. Estacionalidad

La fase del año propuesta para el caudal generador es en los meses de aguas altas, es decir, desde el mes de noviembre al mes de mayo, época en la que se suelen dar las crecidas habituales del río.

Metodología CEDEX para caudales máximos.

Recientemente el CEDEX ha finalizado la elaboración de los mapas de caudales máximos en la red fluvial de las demarcaciones hidrográficas con cuencas intercomunitarias como parte de los trabajos llevados a cabo dentro del Convenio “Asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico en materia de gestión del dominio público hidráulico y explotación de obras”, firmado entre la Dirección General del Agua y el CEDEX. A partir de dichos trabajos, y aguas abajo de los grandes embalses, se ha elaborado un procedimiento alternativo de cálculo para el caudal generador, adicional al ya expuesto conforme establece la IPH.

Como resultado de los trabajos, el CEDEX ha obtenido seis capas SIG en cada una de las demarcaciones hidrográficas estudiadas, con las siguientes características:

- Formato raster.

- Resolución de 500x500 m.
- Los caudales corresponden al régimen natural, es decir, no se ha tenido en cuenta la alteración del régimen hidrológico provocada por la presencia de presas en la cuenca.
- Ofrece información en aquellos puntos de la red fluvial con una cuenca vertiente igual o superior a 50 km².
- Cada uno de los seis mapas corresponde a uno de los siguientes periodos de retorno: 2, 5, 10, 25, 100 y 500 años. (Los caudales correspondientes a periodos de retorno intermedios pueden obtenerse interpolando entre los seis cuantiles proporcionados por los mapas).

De manera complementaria, el CEDEX ha realizado trabajos adicionales orientados a facilitar la estimación de la máxima crecida ordinaria a partir de la información proporcionada por los mapas. Estos trabajos se han basado en los resultados obtenidos a partir de los trabajos realizados para el informe “Aspectos prácticos de la definición de la máxima crecida ordinaria” (CEDEX, 1994).

En el citado informe se pudo establecer una relación entre el caudal de la máxima crecida ordinaria (identificado con el caudal que produce el inicio del desbordamiento del cauce) y diversas magnitudes descriptivas de las características estadísticas de la serie temporal de caudales máximos anuales. De forma aproximada, se puede determinar el caudal correspondiente a la máxima crecida ordinaria (QMCO) en función de la media (Q_m) y el coeficiente de variación (C_v) de la serie temporal de caudales máximos anuales mediante la siguiente expresión:

$$Q_{MCO} = Q_m (0,7 + 0,6 \cdot C_v)$$

Una expresión alternativa, para la que es necesario conocer la ley de frecuencia de caudales máximos, es la siguiente en la que se relaciona el periodo de retorno correspondiente al caudal de la máxima crecida ordinaria (TMCO) con el coeficiente de variación de la serie temporal:

$$T_{MCO} = 5 \cdot C_v$$

Esta última expresión es más útil que la anterior para estimar la máxima crecida ordinaria a partir de la información proporcionada por los mapas de caudales máximos. De esta forma, se ha realizado una estimación del coeficiente de variación regional para cada una de las regiones estadísticas identificadas, a partir del cual se ha estimado, mediante la expresión anterior, el periodo de retorno correspondiente, de forma aproximada, a la máxima crecida ordinaria.

En la siguiente tabla se recogen los valores regionales del coeficiente de variación para las regiones estadísticas correspondientes a las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias, así como los valores correspondientes al periodo de retorno aproximado de la máxima crecida ordinaria.

Región	Cv	T (años)
11	0.59	3.0
12	0.54	2.5
13	0.54	2.5
21	0.48	2.5
22	1.15	6.0
23	0.66	3.5
24	0.75	4.0
25	0.75	4.0
26	0.81	4.0
31	0.79	4.0
32	0.79	4.0
33	1.04	5.0
34	0.76	4.0
41	1.20	6.0
42	1.05	5.5
43	0.83	4.0
51	0.96	5.0
52	0.74	3.5
71	1.13	5.5

Región	Cv	T (años)
72	1.44	6.5
73	1.07	5.5
81	0.87	4.5
82	1.21	6.0
83	1.19	6.0
84	0.88	4.5
91	0.47	2.5
92	0.70	3.5
93	1.36	7.0
94	1.04	5.0
95	1.04	5.0
96	0.74	3.5

De esta forma, el caudal correspondiente a la máxima crecida ordinaria se puede estimar en cualquier punto de la red fluvial, conociendo su periodo de retorno aproximado, mediante interpolación entre los cuantiles proporcionados por los mapas.

Por otra parte, dado que, tanto el caudal de la máxima crecida ordinaria como el caudal generador, se identifican, de manera aproximada, con el caudal que produce el inicio de desbordamiento del cauce, ambos conceptos pueden considerarse como equivalentes. De esta forma, los periodos de retorno expuestos anteriormente para la máxima crecida ordinaria pueden considerarse también válidos para el caudal generador, lo que ha permitido obtener su valor mediante interpolación entre la información proporcionada por los mapas.

Por otra parte, quiere hacerse notar, que en cualquier caso, los resultados teóricos obtenidos por una u otra de las metodologías, deberán ser validados en trabajos posteriores, mediante estudios hidráulicos detallados realizados al efecto.

3. RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN RÍOS TEMPORALES O EFÍMEROS

Para estos ríos, y tras el estudio que se cita a continuación para la temporalidad de los ríos, es de aplicación lo expuesto respecto a la selección de tramos, presencia de especies piscícolas en los tramos, procedimiento de desagregación de las series hidrológicas naturales empleadas, etc.

3.1. Determinación de la temporalidad de los ríos

La clasificación de los ríos, según la ORDEN ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la Instrucción de Planificación Hidrológica, es la que a continuación se plasma literalmente:

“A los efectos de la presente Instrucción, se entenderá por:...

57. *ríos efímeros: cursos fluviales en los que, en régimen natural, tan sólo fluye agua superficialmente de manera esporádica, en episodios de tormenta, durante un periodo medio inferior a 100 días al año.*

58. *ríos intermitentes o fuertemente estacionales: cursos fluviales que, en régimen natural, presentan una elevada temporalidad, fluyendo agua durante un periodo medio comprendido entre 100 y 300 días al año.*

59. *ríos permanentes: cursos fluviales que en, régimen natural, presentan agua fluyendo, de manera habitual, durante todo el año en su cauce.*

60. *ríos temporales o estacionales: cursos fluviales que, en régimen natural, presentan una marcada estacionalidad, caracterizada por presentar bajo caudal o permanecer secos en verano, fluyendo agua, al menos, durante un periodo medio de 300 días al año.”*

Atendiendo a estas definiciones se ha propuesto la siguiente metodología:

Se ha partido de la serie temporal de aportaciones diarias (desagregadas de datos mensuales SIMPA 2) de cada una de las masas, las cuales contienen información del periodo de 1940 al 2006 (792 meses), en aquellos casos en los que no se dispone del total de la serie, cuando menos se presentan datos desde 1970.

Se ha optado por realizar la clasificación respetando la definición de la IPH pero, en vez de utilizar los días en los que fluye caudal se ha realizado en función de los días de cese de caudal; es decir una vez agrupados los datos por año hidrológico se han contabilizado los días que presentan caudales de 0 l/s, tal como propone la “Guía para la Determinación del Régimen de Caudales Ecológicos”.

El primer problema se presenta en la propia definición del cero, es importante acotar la precisión del dato, puesto que si presenta un número elevado de decimales se pueden obtener conclusiones erróneas, en este caso no se presentarían caudales nulos prácticamente nunca. Para subsanar este posible error y teniendo en cuenta los baremos utilizados en la clasificación se ha decidido considerar como valores nulos aquellos que son inferiores a 1 l/s.

Tal y como se expone en la “Guía para la Determinación del Régimen de Caudales Ecológicos”, un factor adicional a tener en cuenta en la clasificación de los ríos temporales está relacionado con su propia variabilidad hidrológica. Resulta necesario establecer un criterio alternativo a los valores medios (por ejemplo el promedio de días con caudal cero para todos los años). Entre otros posibles criterios, resultan muy intuitivos aquellos que se asocian a unas condiciones hidrológicas determinadas, como por ejemplo, el número de días que el río se encontraba sin caudal en un año seco.

Esta aproximación permite una clasificación rápida de los ríos temporales una vez que se conoce el número de días al año que un río determinado está seco. Se ha optado por agrupar el conjunto de valores anuales de caudal nulo y establecer el percentil 80 como equivalente al año seco.

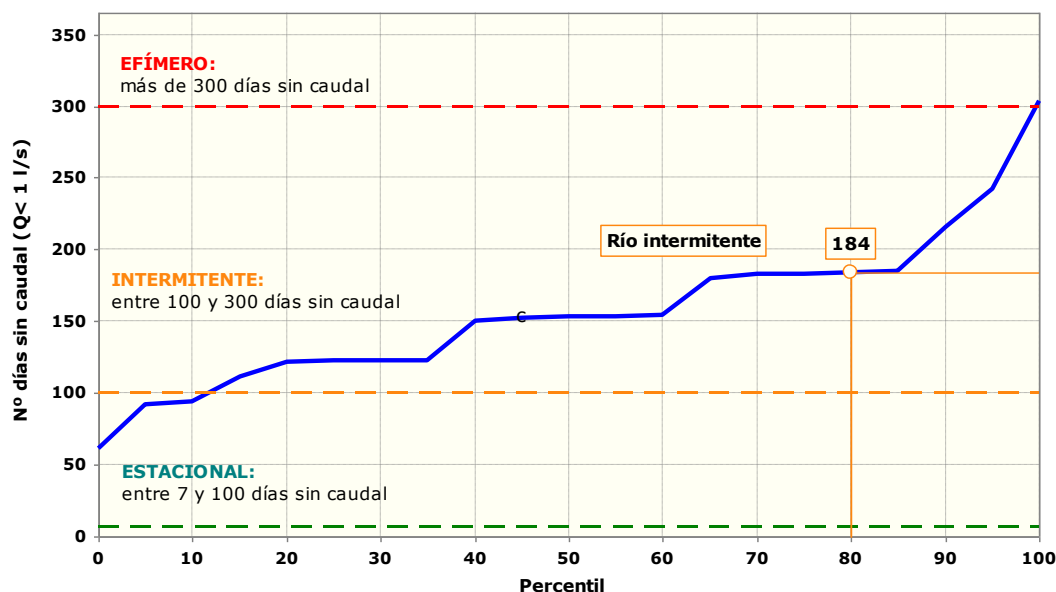
De esta manera se han mantenido los rangos propuestos por la Instrucción de Planificación Hidrológica con la salvedad de que se ha añadido una restricción para el caso de ríos permanentes (dada la interpretabilidad de la propia definición) dando un margen de siete días al año en los que el caudal se mantiene nulo (como explicita la Guía).

Los pasos seguidos para realizar la clasificación de los ríos (según el número de días de cese de caudal) se resumen a continuación:

- Agrupar los caudales diarios en años hidrológicos (desde octubre a septiembre).
- Contar para los años disponibles, el número de días al año con caudal de 0 l/s.
- Sobre la serie de nº de días al año con caudal de 0 l/s, calcular el percentil 80.
- Según el valor del percentil 80, clasificar el río según las siguientes clases:
- - PERMANENTES: fluyen habitualmente durante todo el año; se admite que no lo hagan no más de 7 días al año.

- ESTACIONALES: presentan una marcada estacionalidad, con poco caudal o incluso dejando de fluir, normalmente en verano; se establece un periodo entre 7 y 100 días al año sin caudal.
- INTERMITENTES: tienen una marcada estacionalidad, dejando de fluir entre 100 y 300 días al año.
- EFÍMEROS: fluyen muy esporádicamente, en episodios de tormenta; no fluyen más de 300 días al año.

En la gráfica tipo siguiente se presentan los datos de clasificación de una masa de agua. En ella se enfrentan los días al año con caudal diario menor que 1 l/s ($Q_d < 1 \text{ l/s}$) y la frecuencia de excedencia en tanto por ciento o percentil (se han resaltado los diferentes rangos de caudal para cada tipo de río):



3.2. Determinación del periodo de cese anual

Una vez identificada que la masa es temporal, la metodología para determinar los periodos de cese anuales (más adelante se establece una metodología complementaria para determinar periodos de cese hiperanuales) es la que se expone a continuación, siguiendo los criterios establecidos en la Guía para la Determinación del Régimen de Caudales Mínimos:

Días sin caudal: por debajo de un caudal diario de 1 l/s ($Q < 1 \text{ l/s}$) se considera que el río no fluye.

Evento de cese: mes en el que el río no fluye en un determinado número de días. Se han considerado varios supuestos (10, 15 y 20 días) y en cada caso se selecciona el más apropiado, como se indica más abajo.

A partir de los datos de caudales diarios, se ha procedido como se indica a continuación:

1. Agrupación de los datos de caudal diario en años hidrológicos (desde octubre a septiembre).
2. Contabilización, para cada año, del número de días sin caudal.

Para determinar la frecuencia de los eventos de cese de caudal:

3. Cálculo del número de eventos de cese para cada uno de los años disponibles.
4. Selección entre el percentil 25 y 75 para definir la frecuencia de eventos, a partir de la serie del número de eventos al año.

Seguidamente se expone el procedimiento seguido para determinar la duración del periodo de cese de caudal y su estacionalidad en una masa cualquiera.

5. Selección entre el percentil 0 y 25 para la definición de la duración del período entre meses sin caudal, a partir de la serie del número de días al año sin caudal. Se han calculado los percentiles 0, 5, 10, 15 y 25, para seleccionar el más adecuado, en combinación con el número de días definitorio del evento (10, 15 ó 20 días/mes sin caudal).

DURACIÓN DEL PERIODO DE CESE (DÍAS/AÑO)	PERCENTIL 0:	61
	PERCENTIL 5:	92
	PERCENTIL 10:	94
	PERCENTIL 15:	112
	PERCENTIL 25:	123

Para determinar la estacionalidad de los eventos de cese de caudal:

6. Se registra el mes de ocurrencia para cada uno de los días sin caudal.
7. En el conjunto de todos los días sin caudal, se determinan las frecuencias de ocurrencia para cada uno de los meses del año. A partir de la distribución de frecuencias obtenida, se define la estacionalidad (%). Y con arreglo a estos porcentajes, se distribuyen los días del año sin caudal correspondientes a los percentiles calculados en el punto 5°.

ESTACIONALIDAD (%) Y DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LOS DÍAS SIN CAUDAL SEGÚN PERCENTIL DE DURACIÓN DEL PERIODO DE CESE													
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	Total
Total nº días	498	330	240	310	280	310	513	943	1 474	1 860	1 883	1 200	9 841
Estacionalidad (%)	5%	3%	2%	3%	3%	3%	5%	10%	15%	19%	19%	12%	
Nºdías sinQ (Perc. 0)	3,1	2,0	1,5	1,9	1,7	1,9	3,2	5,8	9,1	11,5	11,7	7,4	61
Nºdías sinQ (Perc. 5)	4,7	3,1	2,2	2,9	2,6	2,9	4,8	8,8	13,8	17,4	17,6	11,2	92
Nºdías sinQ (Perc. 10)	4,8	3,2	2,3	3,0	2,7	3,0	4,9	9,0	14,1	17,8	18,0	11,5	94
Nºdías sinQ (Perc. 15)	5,7	3,8	2,7	3,5	3,2	3,5	5,8	10,7	16,8	21,1	21,4	13,6	112
Nºdías sinQ (Perc. 25)	6,2	4,1	3,0	3,9	3,5	3,9	6,4	11,7	18,3	23,2	23,4	14,9	123

8. Se determinan los meses en los que se produce cese. Como ya se ha dicho anteriormente, se considera que un mes cesa cuando deja de fluir un determinado número de días en ese mes. Dependiendo del este número de días, y para cada percentil calculado, se obtiene la siguiente tabla:

CESE ANUAL SEGÚN EL NÚMERO DE DÍAS AL MES SIN CAUDAL DEFINITORIO DEL EVENTO DE CESE														
EVENTO DE CESE		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	Total (días/año)
PERCENTIL 0	10 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	60
	15 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	0
	20 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	0
PERCENTIL 5	10 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	120
	15 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	60
	20 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	0
PERCENTIL 10	10 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	120
	15 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	60
	20 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	0
PERCENTIL 15	10 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	150
	15 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO	90
	20 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	60
PERCENTIL 25	10 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	150
	15 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO	90
	20 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	60

9. Para elegir el periodo de cese anual de entre estas 15 posibilidades (5 percentiles con tres posibilidades de número de días sin caudal en un mes concreto que implican el cese de ese mes) se ha procedido de la siguiente forma:
 - a. Se totaliza el número de días al año que se produce cese, considerando 30 días por cada mes sin caudal (columna de la derecha), y se calcula, en valor absoluto, la diferencia con respecto a la duración del percentil de referencia correspondiente. Para no desvirtuar los resultados, los casos sin ningún día de cese (total= 0) no se tienen en cuenta.

EVENTO DE CESE		Total (días/año)	Diferencia respecto al percentil de referencia
PERCENTIL 0	10 días/mes sinQ	60	1
	15 días/mes sinQ	0	-
	20 días/mes sinQ	0	-
PERCENTIL 5	10 días/mes sinQ	120	28
	15 días/mes sinQ	60	32
	20 días/mes sinQ	0	-
PERCENTIL 10	10 días/mes sinQ	120	26
	15 días/mes sinQ	60	34
	20 días/mes sinQ	0	-
PERCENTIL 15	10 días/mes sinQ	150	38
	15 días/mes sinQ	90	22
	20 días/mes sinQ	60	52
PERCENTIL 25	10 días/mes sinQ	150	28
	15 días/mes sinQ	90	33
	20 días/mes sinQ	60	63

- b. Para cada bloque correspondiente a un percentil, se calcula la media aritmética de estas diferencias.

EVENTO DE CESE		Total (días/año)	Diferencia respecto al percentil de referencia	Media
PERCENTIL 0	10 días/mes sinQ	60	1	-
	15 días/mes sinQ	0	-	
	20 días/mes sinQ	0	-	
PERCENTIL 5	10 días/mes sinQ	120	28	-
	15 días/mes sinQ	60	32	
	20 días/mes sinQ	0	-	
PERCENTIL 10	10 días/mes sinQ	120	26	-
	15 días/mes sinQ	60	34	
	20 días/mes sinQ	0	-	
PERCENTIL 15	10 días/mes sinQ	150	38	37,3
	15 días/mes sinQ	90	22	
	20 días/mes sinQ	60	52	
PERCENTIL 25	10 días/mes sinQ	150	28	40,8
	15 días/mes sinQ	90	33	
	20 días/mes sinQ	60	63	

- c. Se elige el percentil con menor diferencia media, en este caso 37,3 (Percentil 15), y a su vez, dentro de él, el evento de cese cuya diferencia es menor, 22, que corresponde con 15 días/mes sin caudal.

CESE ANUAL SEGÚN EL NÚMERO DE DÍAS AL MES SIN CAUDAL DEFINITORIO DEL EVENTO DE CESE														
EVENTO DE CESE		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	Total (días/año)
PERCENTIL 0	10 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	60
	15 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	0
	20 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	0
PERCENTIL 5	10 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	120
	15 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	60
	20 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	0
PERCENTIL 10	10 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	120
	15 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	60
	20 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	0
PERCENTIL 15	10 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	150
	15 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO	90
	20 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	60
PERCENTIL 25	10 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	150
	15 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO	90
	20 días/mes sinQ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	60

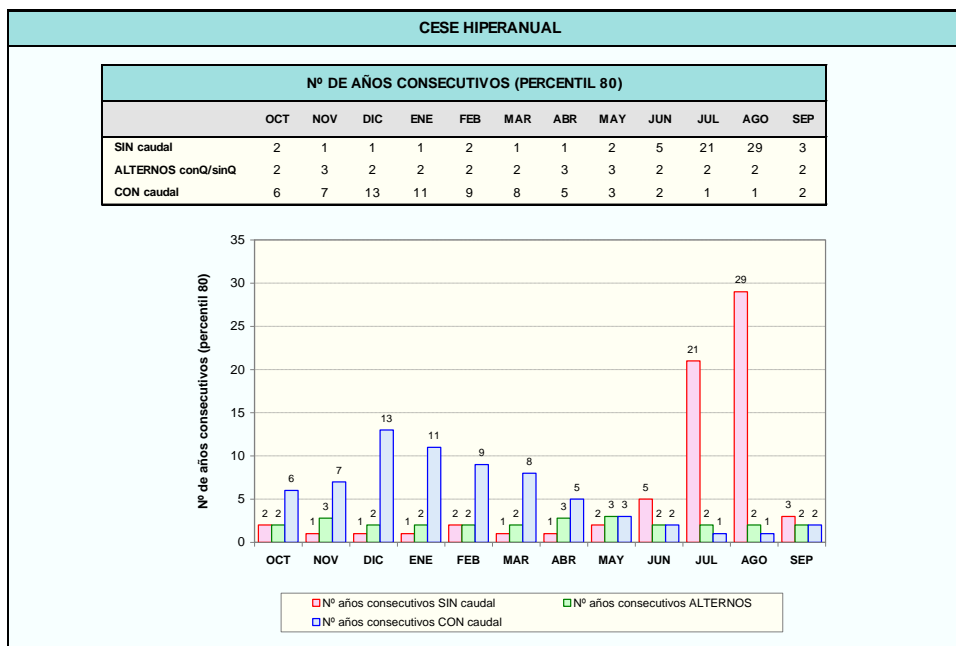
En el ejemplo, el cese anual de caudal se establece en los meses de junio, julio y agosto.

3.3. Determinación del periodo de cese hiperanual

Para completar esta caracterización, se ha procedido a determinar los periodos de cese que se puedan producir con una periodicidad mayor que la anual (cese hiperanual), en concreto, los ceses de caudal en años alternos (periodicidad bienal) y cada cinco años (periodicidad quinquenal). El análisis del número de años consecutivos en los que, en un determinado mes, se ha producido cese o no de caudal permite establecer esta periodicidad. La periodicidad se determina, para cada mes, tal como se detalla a continuación:

1. Se determina la serie de años consecutivos sin caudal, la serie de años alternos consecutivos y la serie de años consecutivos con caudal.
2. Se calcula el número de años consecutivos correspondiente al percentil 80 de cada una de estas tres series (sin Q, alternos y con Q).

Siguiendo con el ejemplo los resultados obtenidos se recogen en la figura adjunta.



En base a estos tres valores de percentil 80 se establece:

- Periodicidad BIENAL (cese de caudal en años alternos): el número de años consecutivos alternos es mayor o igual que el de años consecutivos con caudal (alternos > = conQ)
- Periodicidad QUINQUENAL (cese de caudal cada 5 años): el número de años consecutivos con caudal menos el número de años consecutivos sin caudal es menor que cinco (conQ-sinQ < 5 años)

La propuesta de periodos de cese de caudal para la masa que viene ilustrando esta metodología se recoge en la tabla siguiente.

PROPUESTA DE PERIODOS DE CESE DE CAUDAL													
MESES CON CESE DE CAUDAL Y PERIODICIDAD													
PERIODICIDAD	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	Total (días/año)
ANUAL	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO	90
BIENAL (alternos > = conQ)	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	-	-	-	SI	60
QUINQUENAL (conQ-sinQ < 5 años)	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI	-	-	-	-	-	60

En este caso, y en resumen, se puede observar una marcada estacionalidad de los días sin caudal, que se concentran en los meses de julio (19%) y agosto (19%), se extienden a junio (15%) y algo a septiembre (12%) y mayo (10%). En el resto del año, los días sin caudal prácticamente no superan el 5%. En cuanto a la periodicidad, los meses de junio, julio y agosto cesan todos los años; mayo y septiembre lo hacen en años alternos (bienal); y en los meses de octubre y abril el cese es uno de cada cinco años (quinquenal).

Una vez conocidos los meses en los que por el río no circula caudal, se realiza un estudio similar al de ríos permanentes, evidentemente con las peculiaridades oportunas y descartando los meses sin caudal.

3.4. Cálculo de los caudales ecológicos por métodos hidrológicos

La caracterización ha aportado masas con periodos de cese anuales, con periodos de cese hiperanuales (bienales y quinquenales) y masas que aún siendo temporales según la IPH, no presentan periodos de cese concretos, pues no se dan las secuencias necesarias de días consecutivos sin caudal para cesar un mes completo, es decir, se comportan o se han de tratar pues como si fueran permanentes.

MESES CON CESE DE CAUDAL Y PERIODICIDAD												
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
PERIODICIDAD												
(A = Anual; B = Bienal; Q: Quinquenal)	-	B	B	-	-	Q	-	-	A	A	A	A

NOTA:

El cese en los meses con periodicidad bienal o quinquenal debe ser entendido como recomendable, siempre que sea compatible con la mejor gestión

A partir de aquí se elaboran los indicadores hidrológicos obtenidos de la serie completa anual y los indicadores obtenidos al quitar los periodos de cese anuales, lo que hace subir dichos indicadores. Es decir, se calculan los mismos indicadores Percentiles 5 y 15, caudal básico, Q21 y Q25. Para los resultantes de las medias móviles se toma como inicio de la serie los meses siguientes al cese.

RESULTADOS INDICADORES DEL CAUDAL ECOLÓGICO	SIN CONSIDERAR PERIODOS DE CESE			CONSIDERANDO PERIODOS DE CESE ANUAL		
	Caudal (m³/s)	Aportación anual (hm³/año)	% s/Qnat	Caudal (m³/s)	Aportación anual (hm³/año)	% s/Qnat
Q Básico (series anuales de datos diarios)	0,005	0,16	2,36%	0,012	0,38	5,66%
Percentil 5 (serie de datos diarios) *	0,013	0,41	6,13%	0,024	0,76	11,31%
Percentil 15 (serie de datos diarios) *	0,041	1,29	19,32%	0,052	1,64	24,51%
Q21 (series anuales de datos diarios)	0,020	0,63	9,43%	0,045	1,42	21,21%
Q25 (series anuales de datos diarios)	0,027	0,85	12,73%	0,053	1,67	24,98%

Como factor fundamental, se ha incorporado el concepto, del **Caudal Mínimo de las Medias, entendiéndose éste como el caudal hidrológico mínimo a adoptar.**

Este caudal se corresponde con el mínimo de los caudales medios mensuales, para cada mes, a lo largo de la serie, y se aplica como método de filtrado de posibles resultados anómalos obtenidos con las medias

ANEJO 4 - .APÉNDICE I

móviles, al quitar a éstas de su análisis, parte de los datos diarios con los que trabajan, es decir, al quitarle los meses de cese anual.

Tras obtener los resultados de las medias móviles, se incorporan los correspondientes factores de variación con los que se ha trabajado en las otras etapas, aplicándose el factor de variación igual a la unidad, al mes de menor caudal natural, de los que quedan tras eliminar los meses que cesan.

Finalmente se comparan para cada factor de variación, los resultados de las medias móviles y el caudal mínimo de las medias, y **se adopta para cada mes, aquel que es mayor de ellos**, lo que se localiza en la fila de los caudales adoptados.

MEDIA DE CAUDALES (m³/s)

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Media anual
Q natural	0,120	0,171	0,447	0,445	0,351	0,291	0,272	0,199	0,145	0,099	0,082	0,078	0,212
Perc 5 *	0,024	0,024	0,045	0,030	0,052	0,050	0,052	0,037	-	-	-	-	0,039
Perc 15 *	0,052	0,052	0,064	0,055	0,071	0,072	0,073	0,062	-	-	-	-	0,063
Qmin.de medias**	0,037	0,047	0,052	0,046	0,043	0,069	0,056	0,056	-	-	-	-	0,051
Factor de variación													
F var 1	1,000	1,194	1,930	1,926	1,710	1,557	1,506	1,288	-	-	-	-	
$F \text{ var } 1 = \sqrt{\frac{Q_i}{Q_{\min}}}$	Q básico	0,012	0,014	0,023	0,023	0,021	0,019	0,018	0,015	-	-	-	0,018
	Q 25	0,053	0,063	0,102	0,102	0,091	0,083	0,080	0,068	-	-	-	0,080
F var 2	1,000	1,125	1,550	1,548	1,430	1,343	1,314	1,184	-	-	-	-	
$F \text{ var } 2 = 3 \sqrt{\frac{Q_i}{Q_{\min}}}$	Q básico	0,012	0,014	0,019	0,019	0,017	0,016	0,016	0,014	-	-	-	0,016
	Q 25	0,053	0,060	0,082	0,082	0,076	0,071	0,070	0,063	-	-	-	0,070
F var 3	1,000	1,395	2,000	1,997	1,840	1,723	1,682	1,492	-	-	-	-	
$F \text{ var } 3 = 1 + \sqrt{\frac{Q_i - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}}}$	Q básico	0,012	0,017	0,024	0,024	0,022	0,021	0,020	0,018	-	-	-	0,020
	Q 25	0,053	0,074	0,106	0,106	0,098	0,091	0,089	0,079	-	-	-	0,087
F var 4	1,000	1,000	1,109	1,028	1,168	1,177	1,185	1,092	-	-	-	-	
$F \text{ var } 4 = \sqrt{\frac{\text{Perc } 15_i}{\text{Perc } 15_{\min}}}$	Q básico	0,012	0,012	0,013	0,012	0,014	0,014	0,014	0,013	-	-	-	0,013
	Q 25	0,053	0,053	0,059	0,055	0,062	0,062	0,063	0,058	-	-	-	0,058
Q adoptado ***	F var 1	0,053	0,063	0,102	0,102	0,091	0,083	0,080	0,068	-	-	-	0,080
	F var 2	0,053	0,060	0,082	0,082	0,076	0,071	0,070	0,063	-	-	-	0,070
	F var 3	0,053	0,074	0,106	0,106	0,098	0,091	0,089	0,079	-	-	-	0,087
	F var 4	0,053	0,053	0,059	0,055	0,062	0,069	0,063	0,058	-	-	-	0,059

Los resultados en rojo del caudal adoptado, son aquellos en los que se ha cambiado el Qbas o el Q25 por el Caudal Mínimo de las Medias.

4. MASAS DE AGUA MUY ALTERADAS HIDROLÓGICAMENTE

Tal y como establece la IPH, se ha analizado el grado de alteración hidrológica de las masas de agua de la categoría río mediante el cálculo de índices de alteración hidrológica, los cuales evalúan la distorsión originada en los caudales circulantes con respecto a los caudales naturales, identificándose aquellas masas que se encuentren en un grado severo de alteración hidrológica en la situación actual, presentando conflictos entre los usos existentes y el régimen de caudales ecológicos.

Este trabajo, se ha realizado para las masas simuladas hidrobiológicamente, con el fin de poder ajustar, tal y como dice la IPH, los caudales mínimos a una potencial habitabilidad del 30%.

Para realizar esta evaluación se ha empleado el programa IAHRIS, software diseñado a partir de un convenio entre la DGA y el CEDEX para la aplicación práctica de los índices de alteración hidrológica, basado en el manual “IAHRIS 2.2 Indicador de masas de agua muy alteradas: Manual de referencia metodológica” (Fernández Yuste & Martínez Santa-María, 2010).

En el citado manual se presentan dos métodos para la asignación de la condición de “Masa muy alterada” (MMA):

- El primero de ellos, **método IAH-MMA**, utiliza los resultados de los Índices de Alteración Hidrológica facilitados por la aplicación informática IAHRIS. Los índices obtenidos varían en función de la tipología de los datos facilitados –hasta cuatro situaciones o casos posibles-. Es por ello, que el método IAH-MMA establece, para cada uno de esos casos, las condiciones que deben cumplir los respectivos índices para asignar a la masa en estudio la condición de MMA.
- El segundo de los métodos, o **método P10%-90%**, trabaja exclusivamente con aportaciones mensuales, estableciendo, a partir de los valores en régimen natural, cual es el “rango normal” de variación de las aportaciones mensuales y anuales. Este método establece unos porcentajes a cumplir, fuera de los cuales la masa se cataloga como MMA.

Figura 19. Rasgos más destacados de los dos métodos propuestos

MÉTODO	CASOS POSIBLES	INDICADORES	CRITERIO para MMA
IAH-MMA	Caso 1: datos diarios coetáneos	12 Índices de Alteración Hidrológica IAH1,2,3,5,6,8,10,13,14,16,19,21	C1 más de 6 IAH son $\leq 0,5$ Si 6 IAH son $\leq 0,5$ se aplicará C1a al menos DOS componentes con IAH MEDIO $\leq 0,5$
	Caso 2: datos diarios no coetáneos	12 Índices de Alteración Hidrológica M1,M3,V1,E1,E2,IAH8,10,13,14,16,19,21	C1 más de 6 IAH son $\leq 0,5$ Si 6 IAH son $\leq 0,5$ se aplicará C1a al menos DOS componentes con IAH MEDIO $\leq 0,5$
	Caso 3: datos mensuales coetáneos	5 Índices de Alteración Hidrológica IAH1,2,4,5,6	C2 dos o más IAH son $\leq 0,5$
	Caso 4: datos mensuales no coetáneos	5 Índices de Alteración Hidrológica M1,M3,V1,E1,E2	C2 dos o más IAH son $\leq 0,5$
P10%-90%		Percentiles 10% y 90% mensuales y anual	C3 menos del 50% de los meses o de los años están dentro del rango

El uso conjunto de los dos métodos anteriores, método IAH-MMA y método P10%-90% conforma la herramienta de decisión que se denomina criterio P-IAHRIS.

Figura 20. Síntesis del criterio P-IAHRIS

CATEGORÍA DE LA MASA POR MÉTODO		¿EXISTE DISCREPANCIA?	CARACTERÍSTICAS DE LA MASA	CATEGORÍA DE LA MASA CRITERIO P_IAHRIS
IAH-MMA	P10%-90%			
MMA no MMA	MMA no MMA	no		MMA no MMA
MMA no MMA	No MMA MMA	Si, pero algún método cataloga en condición límite		(1) Se acepta el resultado del método que no está en el entorno del umbral de decisión
MMA	no MMA	si	Amplio rango P10%-90%	(2a) MMA
No MMA	MMA	si	Alteración muy localizada	(2b) MMA
No MMA	MMA	sí	Reducido rango P10%-90%	(2c) No MMA

En los casos en que el criterio P-IAHRIS indica que se trata de masas muy alteradas hidrológicamente, identificación corroborada con el criterio de experto, la estimación para fijar el régimen de mínimos se realiza utilizando el rango comprendido entre el 30% y el 80% del hábitat potencial útil máximo para las especies seleccionadas.

5. RÉGIMEN EN SEQUÍAS PROLONGADAS

Tal y como se especifica en la IPH, en el caso de sequías prolongadas podrá aplicarse un régimen de caudales menos exigente siempre que se cumplan las condiciones que se establece en el Reglamento de la Planificación Hidrológica sobre deterioro temporal del estado de las masas de agua, y de conformidad con lo determinado en el correspondiente Plan de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía. Sin embargo, esta excepción no se aplicará en las zonas incluidas en la Red Natura 2000 o lista de humedales Ramsar.

Este régimen estará caracterizado por una distribución mensual de mínimos y deberá ser determinado mediante simulación de la idoneidad del hábitat. La simulación del hábitat se basará en un umbral de relajación con el objetivo de permitir el mantenimiento, como mínimo, de un 25% del hábitat potencial útil máximo.

La distribución mensual de los caudales correspondientes a éste régimen será proporcional a la distribución mensual correspondiente al régimen ordinario de caudales ecológicos, con el fin de mantener el carácter natural de la distribución de mínimos, conservando las características hidrológicas de la masa de agua.

La adaptación desde el régimen ordinario será proporcional a la situación del sistema hidrológico, definida según los indicadores establecidos en el Plan especial de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía, teniendo en cuenta las curvas combinadas elaboradas para tal fin, y evitando, en todo caso, deterioros irreversibles de los ecosistemas acuáticos y terrestres asociados.