

INFORME SOBRE LOS CAUDALES ECOLÓGICOS MÍNIMOS EN EL RÍO CASTRIL AGUAS ABAJO DEL EMBALSE DEL PORTILLO

Diego García de Jalón Lastra
Catedrático de Universidad
Universidad Politécnica de Madrid

INTRODUCCIÓN

El presente informe se realiza a petición de la Plataforma de Defensa del Castril con objeto de evaluar los caudales ecológicos que al menos deberían circular por el cauce del río Castril para que su masa de agua conservara su Buen Estado o Potencial Ecológico, en su caso.

ANTECEDENTES

Como antecedente de este informe es necesario citar el trabajo que se realizó en el río Castril realizado por una colaboración científica entre dos equipos de las Universidades de Granada y la Universidad Politécnica de Madrid (ASISTENCIA TÉCNICA PARA LA VALORACIÓN, SEGUIMIENTO Y PROTECCIÓN DE POBLACIONES FAUNÍSTICAS DEL RÍO CASTRIL) que coordinó el profesor Javier Alba Tercedor y que se realizó por encargo del Director del Parque Natural de la Sierra de Castril en el año 2002. En dicho trabajo ya incluyó una evaluación y propuesta de Caudales Ecológicos que fue realizado por el equipo que dirigía el autor del presente Informe, pues se acababa de cerrar la Presa de El Portillo, y las alteraciones de su régimen de caudales en el tramo aguas abajo se percibía como una amenaza a su integridad ecológica. Dicha evaluación de Caudales ecológicos (ver Anejo 1) se realizó con una metodología muy precisa, basada en el análisis de la simulación del hábitat físico que se cuantificaba en los requerimientos mesológicos de la subespecie endémica trucha común del río Castril. Esta metodología partía de una simulación hidráulica de dos dimensiones y atendía a los requerimientos de todos los estados de desarrollo de la trucha (adulto, juvenil, alevín y freza).

Posteriormente, con motivo de la implementación de la Directiva Marco del Agua, y principalmente atendiendo a los requerimientos de los Planes Hidrológicos, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir encargó la realización de estudios de caudales ecológicos por simulación de hábitat en 32 masas fluviales, entre las que se incluyeron dos en el río Castril, una aguas arriba del Embalse del Portillo (ES0511012036) y otra aguas abajo (ES0511100107).

En el Real Decreto 112016 de 8 de Enero, por el que se aprueba la revisión de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, GUADALQUIVIR, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte Española de las Demarcaciones Hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro, publicado en el BOE nº 16 de 19 de Enero de 2016, se establecen los caudales ecológicos para dichas masas que conforman el Río Castril. En concreto, en las Tablas 7.1.1, 7.1.4., y 7.2.1, del APENDICE 7 al que se remite el artículo 10 del ANEXO VII. DISPOSICIONES NORMATIVAS DEL PLAN HIDROLÓGICO DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADALQUIVIR, se recogen respectivamente los caudales mínimos en condiciones ordinarias y en situaciones de sequía prolongada para

la masa de agua de la categoría río con el código ES.50MSPF011100107- río Castril aguas abajo de la presa del Portillo y para la masa de agua de la categoría río con el código ES050MSPF011012036- río Castril aguas arriba de la presa del Portillo, así como el régimen de caudales mínimos aguas abajo del embalse del Portillo.

En la tabla nº 1 adjunta se trasponen dichos caudales mínimos en ambas masas.

Tabla 1.- Caudales ecológicos mínimos fijados para las masas de agua del río Castril por la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir.

Aguas arriba E. Portillo		Aguas abajo E. Portillo	
	m3/s		m3/s
Oc	0.39	Oc	0.36
Nv	0.42	Nv	0.43
Dc	0.42	Dc	0.81
En	0.45	En	0.75
Fb	0.5	Fb	0.82
Mr	0.54	Mr	0.81
Ab	0.57	Ab	0.87
My	0.46	My	0.71
Jn	0.56	Jn	0.6
Jl	0.42	Jl	0.45
Ag	0.41	Ag	0.41
Sp	0.39	Sp	0.37
MEDIA	0.46	MEDIA	0.62
MEDIANA	0.44	MEDIANA	0.66

ESTUDIO COMPARATIVO

Los caudales que la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (DHG) son sensiblemente inferiores a los que se propusieron en el estudio que hicimos en el año 2002 para el Parque Natural (ver figura 1).

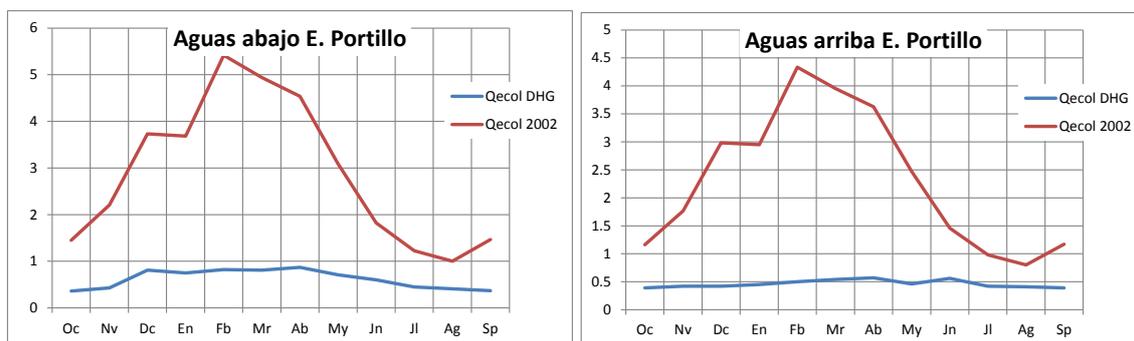


Figura 1.- Comparación de los Regímenes de Caudales Ecológicos propuestos por la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir en el Plan Hidrológico y los propuestos en el Estudio realizado en el 2002.

Los caudales ecológicos propuestos en el estudio del 2002 por nuestro equipo representan cinco veces los caudales ecológicos propuestos por la DHG en el tramo aguas arriba del Embalse del Portillo, mientras que en tramo aguas abajo la proporción se reduce a algo más de cuatro veces. Las diferencias se deben no sólo a las metodológicas y de criterios de selección de umbrales en los requerimientos de la trucha, sino principalmente a la

estimación cuantitativa de lo que serían las condiciones de referencia hidromorfológica, en concreto, el régimen de caudales naturales.

Evidentemente, los caudales ecológicos evaluados en el 2002 tenían por objetivo la conservación de las especies acuáticas (macroinvertebrados, peces y nutria) incluidas en el Parque Natural, y por ello se seleccionó como especie indicadora la trucha del río Castril. En el caso de la propuesta de la DHG su objetivo se basa en el mantenimiento del Buen Estado o Potencia Ecológico, pero que al final utilizó también la trucha como indicador. La metodología empleada en ambas propuestas también se basan en la utilización del régimen natural como paradigma de los caudales ecológicos, asumiendo que si las especies han evolucionados en esas condiciones naturales, en ellas encuentran sus hábitats óptimos. El problema surge al estimar cual es el régimen natural de Caudales. En la tabla 2 se representan los caudales naturales considerados, junto a los caudales que realmente han circulado por el río Castril, y para comparación las propuestas de Caudales Ecológicos, en el tramo de aguas debajo de la Presa del Portillo, pues desde el punto de vista de la gestión efectiva es la que más interesa.

Tabla 2.- Regímenes de Caudales (m3/s) del río Castril aguas abajo del Embalse del Castril: el régimen natural estimado por el modelo de Simulación hidrológica (SIMPA); el evaluado en el estudio de 2002, y el régimen casi natural de caudales circulantes antes de la construcción del embalse (1976-1999); régimen de caudales después de cerrar la presa (Caudales regulados); y los caudales ecológicos propuestos por la DHG y por el estudio que realizamos en el 2002.

(m3/s)	Qnatural			Qregulado 2001-13	Qecol	
	SIMPA	Est. 2002	1976-99		DHG	Est. 2002
Oct	2.21	1.83	2.35	0.98	0.36	1.45
Nov	2.95	2.78	3.31	2.12	0.43	2.21
Dic	2.61	4.69	6.18	2.86	0.81	3.73
Ene	2.51	4.64	5.98	3.98	0.75	3.69
Feb	2.26	6.81	6.52	4.31	0.82	5.42
Mar	1.69	6.21	4.52	5.10	0.81	4.94
Abr	1.07	5.70	4.30	3.61	0.87	4.54
May	0.69	3.89	4.11	2.39	0.71	3.09
Jun	0.42	2.29	3.36	1.38	0.6	1.82
Jul	0.34	1.54	1.88	1.22	0.45	1.23
Ago	0.55	1.26	1.71	1.19	0.41	1.00
Sep	1.52	1.84	2.50	1.09	0.37	1.47

Los regímenes de Caudales Naturales aguas abajo del Embalse del Portillo analizados se han representado en la figura 2. Vemos que la evaluación del modelo de simulación hidrológica SIMPA utilizado por la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir es significativamente inferior a los caudales naturales estimados por el estudio del 2002 y sobre todo inferior a los caudales naturales medidos que circulaban en el periodo 1976-1999 de antes del embalse. En efecto, los caudales que han circulado de forma natural por el río Castril hace dos décadas son dos veces y medio superiores a los que estima el SIMPA. Los caudales naturales estimados por el estudio del 2002 son también mayores llegando a 2,3 veces los estimados por el SIMPA.

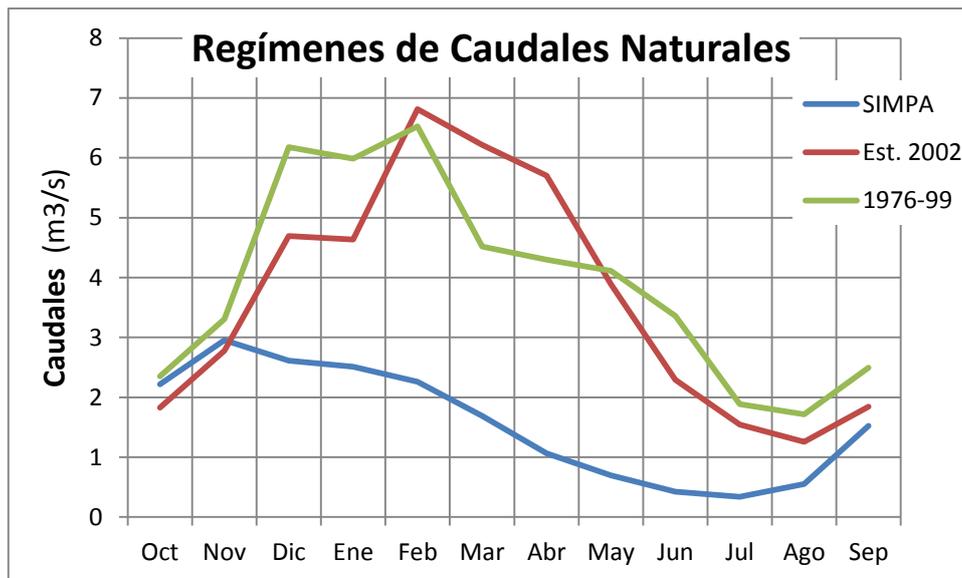


Figura 2.- Valores de los regímenes de caudales naturales en el río Castril aguas abajo del Embalse del Portillo: el modelo de simulación SIMPA; el estimado por el estudio 2001 ; y los caudales aforados sin Embalse.

Es obvio, que la Simulación Hidrológica subestima los caudales naturales, pues no tiene sentido que los caudales que realmente se han medido sean mucho mayores que los estimados. Por mucho calentamiento global que haya existido nunca podrá justificar una reducción de más de la mitad. Pero es que los caudales actuales después del Embalse en funcionamiento (2001-2014), con toda la evaporación que su superficie reduce la escorrentía, los caudales regulados medidos siguen siendo un 60% superiores al régimen natural estimado por el SIMPA (ver tabla 2).

El error a nuestro juicio está basado en que los modelos hidrológicos al ligar las precipitaciones con escorrentía son imprecisos en las cuencas donde predominan geologías kársticas. En efecto, en estas los procesos de infiltración y la escorrentía subterránea constituyen un aporte muy importante a los caudales fluviales, y su cuantificación precisa de estudios hidrogeológicos intensos, debido a que por un lado las cuencas hidrográficas no coinciden con las topográficas, y por otro la respuesta hidrológica de las escorrentías superficiales a las precipitaciones tienen retrasos de diversa magnitud.

En el caso del Castril, la magnitud de sus afloramientos y fuentes en cabecera (manantiales del Castril, Túnez, La Magdalena y El Buitre) claramente provienen de zonas más al Norte de los Campos de Hernán Perea en la Sierra de Cazorla-Segura fuera de su cuenca topográfica. Por tanto pensamos que el ajuste de los parámetros del modelo SIMPA, en este caso ha conducido a caudales simulados claramente subestimados.

Los caudales ecológicos de propuestos por la DHG son una proporción (basada en diversos criterios) de los caudales naturales simulados por el SIMPA, al estar estos últimos calculados por defecto, los caudales ecológicos propuestos. En concreto, si el caudal mediano del régimen ecológico ha de mantener la misma proporción con el caudal mediano del régimen natural (41%), y asumimos un caudal natural como el que se ha medido (1976-1999 de tabla 2), el caudal ecológico que la DGH debería haber propuesto (siguiendo sus mismos criterios) debería tener una mediana de 1,52 m³/s, tal como se expone en la figura 3. Se trata de unos caudales ecológicos mucho más realistas que la propuesta de la DHG pues pasan del un módulo de 0,66 a tener 1,52 m³/s, lo que representan el 37 % del régimen natural, pero que siguen siendo muy inferiores a los caudales ecológicos propuestos por el estudio del 2002 cuyo modulo estaba en 2,88 m³/s (74% del caudal natural).

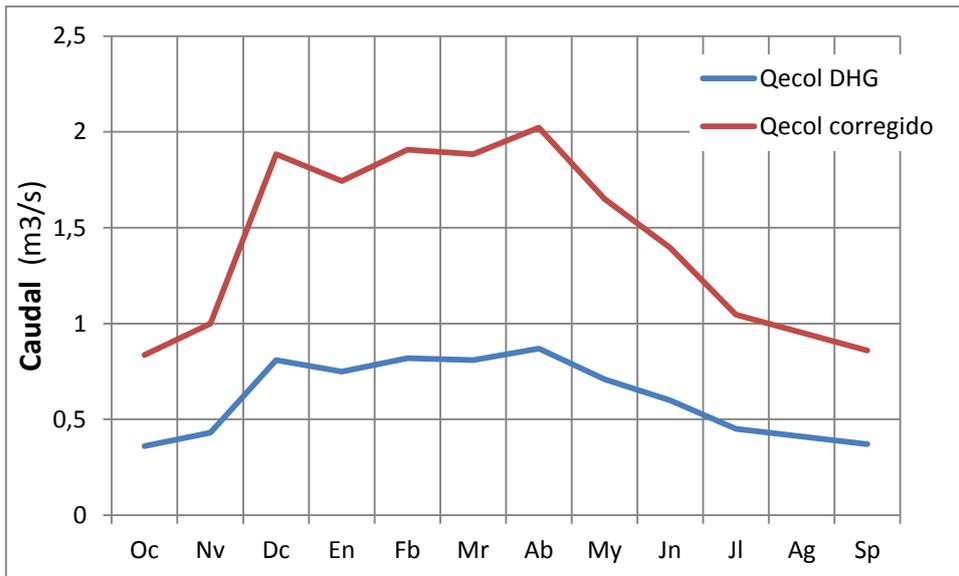


Figura 3.- Comparación del régimen de caudales ecológico propuesto por la DHG, con el corregido atendiendo a los errores del modelo SIMPA empleado para su desarrollo.

CONCLUSIONES

Los regímenes de caudales ecológicos tienen por objeto mantener, o en su caso alcanzar el buen estado ecológico, o el buen potencial ecológico. En el caso que hemos analizado sólo hablamos de los caudales mínimos (que son una parte del régimen de caudales ecológicos), ya que las demás componentes no han sido definidas ni en magnitud, ni frecuencia, ni duración.

Hemos visto que los caudales mínimos que propone la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir son defectuosos tanto por lo reducido de su magnitud, como por los errores en que se ha basado su cálculo. En efecto, los caudales ecológicos propuestos representan menos del 16% del caudal natural del río Castril. No existe ningún trabajo científico que pruebe que un río con la biodiversidad del Castril, haya mantenido su integridad ecológica, después de haberle reducido su caudal circulante en más de un 84 %. No hace falta ser un experto en ecología fluvial para darse cuenta que sus comunidades acuáticas se verán afectadas por tal reducción, en especial la fauna de mayor envergadura como los peces cuyos requerimientos de hábitat exigen volúmenes y calados grandes. Se puede argumentar que el buen estado ecológico se mantiene con una reducción de caudales del 20, del 30, o del 50 %; pero a nadie con sentido común se le ocurre pensar que si al Castril le disminuimos sus caudales circulantes por el cauce en un 70, 80 o 90 % no se provocan impactos a su fauna acuática significativos.

El hecho que los caudales que circulen por el Castril se reduzcan sensiblemente representa un peligro para la supervivencia de muchas de sus

especies acuáticas. Ello se debe a que la fauna acuática del Castril tiene un gran valor biogeográfico, pues constituye un endemismo clave de especies de aguas frías, que se encuentran en su límite meridional de su distribución natural, como es el caso de la subespecie de trucha del Castril cuyo origen es circum-mediterráneo (a diferencia de la mayoría de las poblaciones de trucha ibérica). Además, el cambio climático constituye una amenaza importante precisamente por su ubicación meridional. Efectivamente, el calentamiento global se predice especialmente intenso en el Sur de la Península, y la reducción de caudales actúa como factor sinérgico favoreciendo el aumento de temperaturas del agua y por tanto convierte en crítica dicha amenaza de extinción.

Finalmente, consideramos que es absurdo que se evalué el régimen de Caudales Naturales calculado por simulación hidrológica (SIMPA) con valores inferiores a los que circulan tanto en la actualidad, como antes de la construcción de la presa del Portillo. Por tanto, las propuestas de Caudales Ecológicos de la DHG están infravaloradas pues su metodología de cálculo se basa en dicho régimen de caudales naturales.

ANEXO 1

ESTIMACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN EL RÍO CASTRIL



2002

autores:

**Diego García de Jalón, Julio Lureña, Carlos Alonso,
Ana Seves, Javier Cortázar y Ezequiel García.**



Laboratorio de Hidrobiología
Escuela Ingenieros de Montes
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

1. INTRODUCCIÓN

Cada vez tienen mayor importancia en la toma de decisiones sobre los proyectos desarrollados en el medio natural, los impactos ambientales que dichos proyectos pueden traer consigo, debido a la creciente sensibilidad de la sociedad frente a los procesos de degradación de la Naturaleza.

Las actuaciones y proyectos llevados a cabo en los ríos están cada vez más condicionados a esta evaluación ambiental de sus efectos, teniendo en cuenta que las tradicionales obras hidráulicas (presas y encauzamientos) suponen una alteración drástica de su régimen natural de caudales y, como consecuencia de ello, una modificación muy intensa de la composición, estructura y funcionamiento de sus comunidades biológicas (Ward y Standford, 1.979; Petts, 1.984).

El agua procedente de los ríos, objeto de dichos proyectos, puede ser la base de desarrollo económico de muchas regiones, al ser utilizada como recurso hídrico para regadío, generación de energía eléctrica, etc., de gran interés en zonas empobrecidas o con pocos recursos alternativos de desarrollo.

Pero aún en estos casos es necesario compatibilizar el aprovechamiento del agua como recurso hídrico con el uso para otros fines, como navegación deportiva, baños, recreo, mantenimiento del paisaje fluvial o fines científicos, salvaguardando en todos los casos el agua necesaria para el buen funcionamiento del ecosistema fluvial.

El presente estudio atiende a esta problemática y tiene por objeto proponer un régimen de caudales ecológicos para el río Castril, suficiente para el mantenimiento como ecosistemas de los tramos de río regulados aguas abajo de las obras hidráulicas existentes: minicentral hidroeléctrica y embalse de El Portillo.

2. METODOLOGÍA

En este trabajo se ha utilizado la metodología IFIM (*Instream Flow Incremental Methodology*), desarrollado por el *U.S. Fish and Wildlife Service* y ampliamente descrito por Bovee (1.982, 1.995 y 1.998). Esta metodología, junto con su herramienta informática PHABSIM (*Physical Habitat Simulation*) se fundamenta en la caracterización del hábitat con el fin de ver, a través de curvas de preferencia del hábitat físico, cuál es el uso de ese hábitat por una especie o conjunto de especies en cada estado de desarrollo y, mediante la realización de una simulación hidráulica, cómo cambia el uso de dicho hábitat en función de las características del caudal circulante. Entre los distintos métodos disponibles, éste es el que integra un mayor número de variables hidrológicas, geomorfológicas y biológicas.

La herramienta de simulación PHABSIM utiliza un modelo hidráulico unidimensional que, en la actualidad y debido al aumento de la potencia de cálculo de las computadoras, puede ser sustituido por un modelo en dos dimensiones. Estos modelos de dos dimensiones son útiles en estudios donde es importante la distribución local detallada de profundidades y velocidades, como ocurre en el caso de la evaluación del hábitat de los peces (Steffler, 2.000).

Para el presente estudio se ha usado un programa desarrollado por Peter Steffler en la universidad de Alberta, en Canadá, llamado RIVER2D. Este programa utiliza un modelo de simulación hidráulica de dos dimensiones a través de elementos finitos, que permite valorar el hábitat físico piscícola.

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

La caracterización física del cauce se ha llevado a cabo a partir del tipo de sustrato, teniendo en cuenta que este factor condiciona los tipos de refugio y zonas de freza presentes en el río.

Respecto a la simulación hidráulica, se ha partido de un levantamiento topográfico de cada una de las estaciones de muestreo, a partir del cual se ha obtenido: la descripción morfológica del cauce; la granulometría del sustrato para estimar su rugosidad; el caudal

circulante medido directamente con correntímetro; y las dimensiones de la lámina de agua en cada tramo, correspondiente al caudal circulante en el momento del aforo.

Se han utilizado las curvas de preferencia correspondientes a la trucha común, (*Salmo trutta*), y al barbo gitano (*Barbus sclateri*).

2.1. ESTACIONES DE MUESTREO

2.1.1. ELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

A partir de un análisis cartográfico, complementado por una visita al campo, se han seleccionado las estaciones de muestreo a utilizar en el presente estudio.

En el estudio cartográfico, a partir de mapas a distintas escalas, se aprecian los cambios en la geomorfología del cauce, pendiente longitudinal, vegetación, geología y usos del suelo, así como la ubicación de los principales obstáculos artificiales (presas), de forma que se puede caracterizar la zona de estudio, dividirla en tramos y establecer unas estaciones iniciales de muestreo.

Mediante una visita al campo y recorridos a pie se han corroborado o desechado los tramos inicialmente propuestos como estaciones de muestreo. Como resultado de este proceso, finalmente se ha trabajado sobre las estaciones que se describen en el siguiente apartado.

2.1.2. DESCRIPCIÓN DE LAS ESTACIONES DE MUESTREO

C-1: Los Inhiestares

Aguas arriba del azud de la minicentral de generación de energía eléctrica.

Coordenadas U.T.M.: 30S0522329 Y:4195571

Paraje: Los Inhiestares

Término municipal: Castril

Altitud: 1.215 m
Distancia al nacimiento: 0,867 km
Denominación de la estación: C-1
Accesos: Pista que va al Poblado de la minicentral. Sale de la C-330

C-2: La minicentral

Aguas abajo del azud de la minicentral. Aguas arriba de la suelta de agua de la minicentral.

Coordenadas U.T.M.: 30S0522320 Y:4194644
Paraje: Poblado de la minicentral
Término municipal: Castril
Altitud: 1.180 m
Distancia al nacimiento: 1,772 km
Denominación de la estación: C-2
Accesos: Pista que sale de la carretera comarcal C-330

C-3: Cortijo de la Saludada

Aguas abajo de la suelta de agua de la minicentral.

Coordenadas U.T.M.: 30S0521523 Y:4192755
Paraje: Cortijo de la Saludada
Término municipal: Castril
Altitud: 1.040 m
Distancia al nacimiento: 4,708 km

Denominación de la estación: C-3
Accesos: Pista que sale de la carretera comarcal C-330

C-4: Puente de Lézar

Representativo del tramo anterior al embalse de El Portillo.

Coordenadas U.T.M.: 30S0519905 Y:4188922
Paraje: Puente de Lézar
Término municipal: Castril
Altitud: 940 m
Distancia al nacimiento: 9,105 km
Denominación de la estación: C-4
Accesos: Pista que sale de la carretera comarcal C-330

C-5: Castril

Aguas abajo de la presa del embalse de El Portillo.

Coordenadas U.T.M.: 30S0518892 Y:4183433
Paraje: Castril
Término municipal: Castril
Altitud: 840 m
Distancia al nacimiento: 15,981 km

Denominación de la estación: C-5
Accesos: Carretera comarcal C-330

C-6: Los Laneros

Representativo del tramo medio del río Castril.

Coordenadas U.T.M.: 30S0517633 Y:4173293
Paraje: Los Laneros
Término municipal: Castril
Altitud: 710 m
Distancia al nacimiento: 31,56 km
Denominación de la estación: C-6
Accesos: Carretera que sale de Cortes de Baza

2.1.3. CALENDARIO DE MUESTREO

El trabajo de campo para la estimación del régimen de caudales ecológicos se estructuró en dos campañas de muestreo. En la primera, en junio de 2001, se realizó el levantamiento topográfico del lecho y se midió la altura de la lámina de agua y el caudal circulante por el tramo. En la segunda campaña, en enero de 2002, se volvió a medir la

altura de la lámina de agua y el caudal circulante. A continuación se detallan las fechas de muestreo en cada estación:

Tabla 2.1. Calendario de muestreo.

Estación	1ª Campaña	2ª Campaña
C-1	13/6/01	17/1/02
C-2	15/6/01	17/1/02
C-3	14/6/01	16/1/02
C-4	16/6/01	16/1/02
C-5	15/6/01	16/1/02
C-6	12/6/01	15/1/02

2.2. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Para llevar a cabo la simulación hidráulica es necesaria la realización de una topografía detallada del tramo, para lo que se ha empleado una Estación Total de Topografía Pentax modelo PCS 315 y el prisma apropiado. Es especialmente importante la medición de la línea de orillas con alta precisión ya que de ello va a depender la bondad de la simulación. El resto de la topografía del cauce y de las zonas exteriores (para la simulación de caudales mayores al circulante), debe responder a las características y complejidades del tramo, de forma que queden reflejados los detalles topográficos. El número de puntos para determinar la topografía de un tramo es, por lo tanto, variable. Sin embargo es recomendable no bajar de los doscientos puntos salvo en casos de ríos muy pequeños, no muy irregulares y con escasa llanura de inundación. En cada punto medido y con el fin de abordar la simulación, no sólo hidráulica sino del hábitat físico, se anotará el tipo de sustrato presente, según la clasificación descrita en la tabla 2.2. Esta descripción del sustrato servirá también para la estimación de la rugosidad del lecho.

El coeficiente de rugosidad empleado se fija dentro del programa RIVER2D por las características granulométricas y la morfología del lecho, a través del coeficiente de la “altura de rugosidad efectiva”, que tiende a mantenerse constante en un espectro amplio de profundidades. Las rugosidades empleadas en este estudio son las siguientes:

Tabla 2.2. Clasificación del sustrato y su rugosidad relativa

Sustrato	Rugosidad relativa (m)
1. Fangos, limos, arcillas, tierra	0,01
2. Arenas (0,6 - 3 mm)	0,05
3. Gravas (4 - 9 mm)	0,03
4. Cantos rodados (10-300 mm)	0,07
5. Bolos, troncos (<300 mm)	0,7
6. Roca madre	0,1
7. Vegetación acuática	0,4
8. Matorral, herbáceas, raíces, ramas muertas	0,3
9. Árboles y arbustos	0,2

Para cada una de las tipologías anteriores, el programa también es capaz de asignar una preferencia a través de las curvas de preferencia.

2.3. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL CIRCULANTE

El estudio de las condiciones hidráulicas exige también la determinación del caudal circulante en el momento del muestreo, así como la altura de la lámina de agua.

Para ello realizamos en cada estación de muestreo dos secciones transversales, una de entrada (aguas arriba) y otra de salida (aguas abajo), con unas condiciones hidráulicas lo suficientemente buenas como para realizar una buena medición del caudal circulante.

Cada sección transversal se inicia en la margen derecha, desde el extremo exterior de la ribera, y se continúa atravesando el cauce hasta el extremo más exterior de la ribera por la margen izquierda. Las mediciones de distancias y profundidades se hacen cada vez que se observa un cambio de pendiente, de granulometría del sustrato, velocidad de la corriente, profundidad, etc. y siempre deben incluir los puntos relativos a los extremos de la lámina de agua (orillas propiamente dichas).

Cada sección debe quedar definida al menos por 10 puntos relativos al cauce o lecho del río. Como recomendación general se establece que las mediciones en el lecho se efectúen cada vigésima parte de la anchura del cauce (ej: la sección de un cauce de 10 m de anchura deberá ser estimada cada $10/20 = 0,5$ m).

En cada punto se mide la profundidad con una vara graduada o profundímetro y a continuación se mide la velocidad del agua a una profundidad de la superficie del agua de 0,6 veces el calado, con la ayuda de un correntímetro Valeport modelo 801.

2.4. SIMULACIÓN HIDRÁULICA

Para la simulación hidráulica se ha utilizado el modelo bidimensional llamado RIVER2D desarrollado en la Universidad de Alberta (Canadá). Como ya hemos visto, en los modelos de dos dimensiones debe realizarse un levantamiento topográfico del lecho y debe medirse la altura de la lámina de agua y el caudal que corresponde a esa altura de agua. Estas mediciones

son las condiciones de contorno que se definen en el programa: la altura del agua y el caudal de la sección de entrada o aguas arriba y la altura de agua en la sección de salida o aguas abajo.

Las condiciones de contorno con las que se ha ajustado el modelo hidráulico RIVER2D se refieren a la altura y al caudal en la sección de entrada y a la altura de agua en la sección de salida o aguas abajo. A partir de estos valores, se han ido calculando los pares de valores altura-caudal a la salida de cada tramo, mediante el ajuste de la siguiente expresión:

$$q = a \cdot d^b$$

donde “ q ” es el caudal por unidad de anchura $\left(\frac{m^3}{m \cdot s} = \frac{m^2}{s}\right)$, “ d ” es la altura del agua en un punto de la sección y “ a ” y “ b ” son dos constantes que se ajustan en base a los datos de caudal-altura de agua.

2.5. CURVAS DE PREFERENCIA DE LA FAUNA

Los requerimientos de la componente biológica del ecosistema fluvial respecto a su hábitat son incorporados en la metodología IFIM mediante las llamadas curvas de preferencia, o funciones que cuantifican las preferencias y tolerancias de las especies acuáticas para cada combinación de condiciones ambientales. Estas funciones de preferencia son elaboradas por especialistas en las especies o comunidades que se pretende proteger.

Con este fin se seleccionan aquellas variables del medio acuático que tienen un control predominante sobre las poblaciones y las comunidades, y que se ven afectadas por la regulación de los caudales que circulan por el cauce. Entre estas variables se incluyen obviamente las hidráulicas de estimación más sencilla, como la velocidad del agua y su profundidad, el perímetro mojado o la anchura del cauce, y en ocasiones otras de estimación más compleja como el espesor de la capa límite o la tensión de arrastre. Además, también se utilizan variables de muy diversa índole como la temperatura del agua, el sustrato del fondo o la cobertura del cauce, que también se ven frecuentemente alteradas por la regulación de los caudales. En el presente estudio las variables consideradas han sido la profundidad, la velocidad del agua y el tipo de sustrato del fondo.

Cada especie encuentra su óptimo en un rango de variación de cada variable, y fuera del mismo tolera las condiciones existentes o deja de poder existir ante ellas. Se puede así definir, para cada variable, una curva de preferencia de alguna especie representativa de la fauna del río, que se uniformiza para fluctuar entre 0 y 1, de forma que se da el valor 0 para valores de la variable que resulten intolerables, y el valor 1 para aquellos valores que resulten óptimos para la especie.

Para la elaboración de las curvas de preferencia es necesario evaluar la respuesta de una población o una comunidad ante los cambios de cada una de estas variables seleccionadas. Cuando se trata de poblaciones de especies bien conocidas se pueden evaluar estas respuestas teniendo en cuenta los datos aportados por la bibliografía, complementados por la experiencia propia. Sin embargo, cuando éste no es el caso o bien se necesita una mayor precisión en la respuesta biológica en un tramo de río concreto, es necesario el muestreo y la medición en el campo.

Si se quiere afinar más en el empleo de las curvas de preferencia, deberemos tener en cuenta que las exigencias de hábitat de una misma especie varían a lo largo de su desarrollo, y por lo tanto se necesitarán diferentes curvas de preferencia para cada estado de desarrollo.

2.5.1. CURVAS DE PREFERENCIA DE LA TRUCHA COMÚN

Las curvas de preferencia que se han utilizado para la trucha común, están basadas en las de Bovee (1.976) y adaptadas a nuestro país (García de Jalón et al, 1.990). Describen las preferencias de esta especie en cuanto a velocidad del agua, profundidad y tipo de sustrato, en los estados de adulto, juvenil, alevín y huevo (freza). En las siguientes figuras se adjuntan estas funciones.

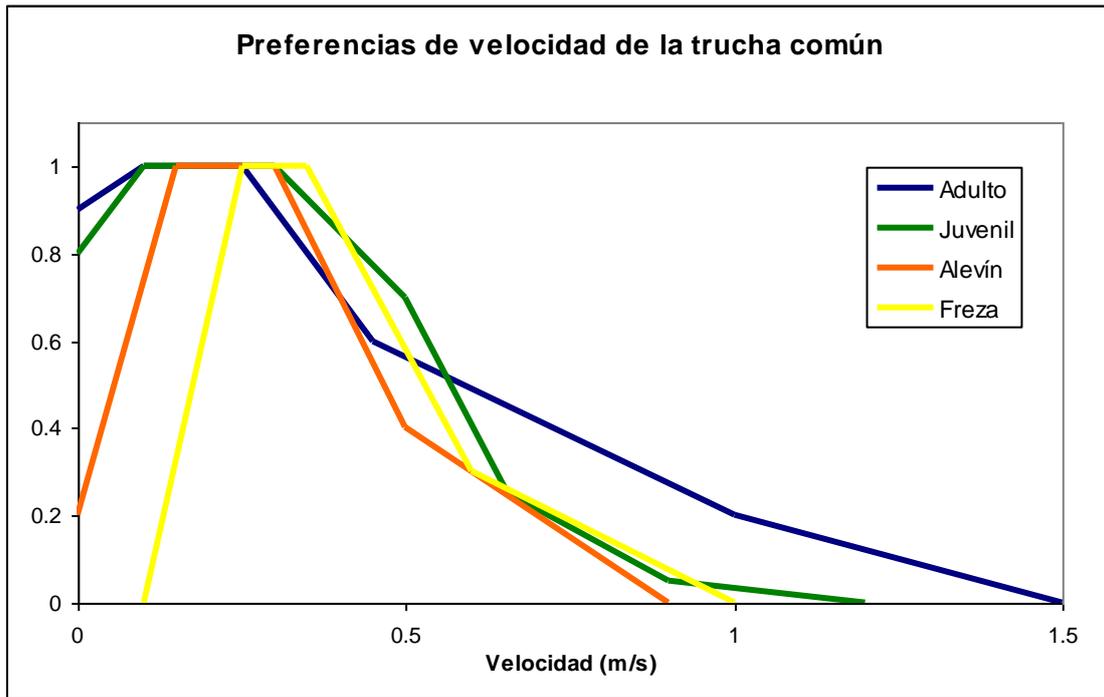


Fig. 2.1. Curvas de preferencia de velocidad del agua para la trucha común.

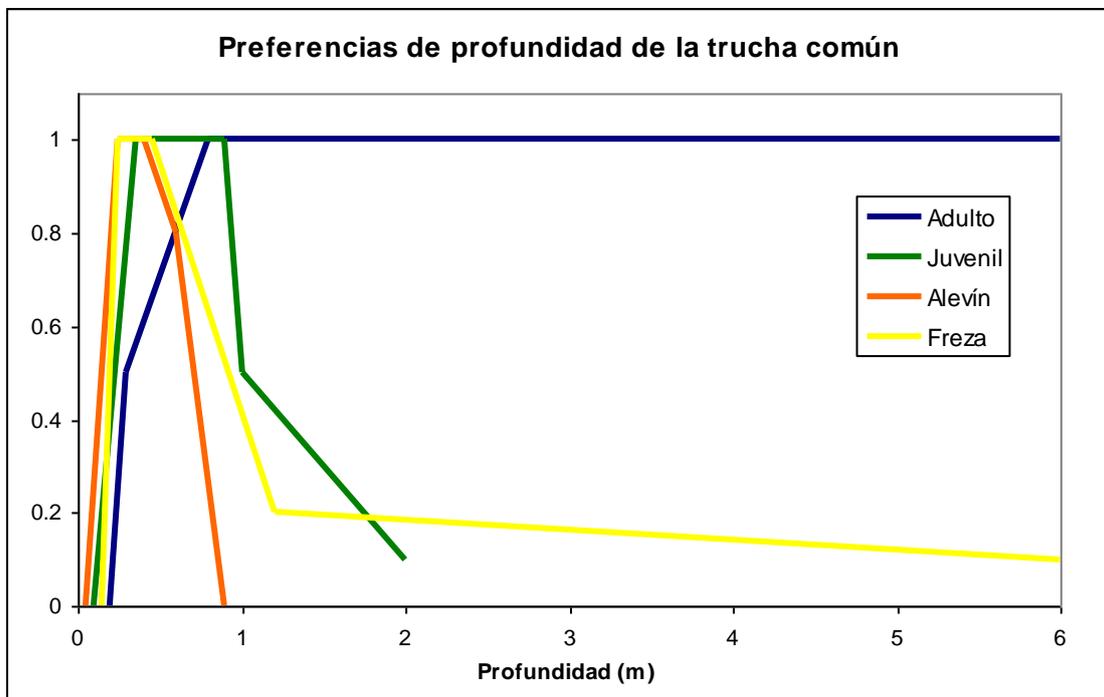


Fig. 2.2. Curvas de preferencia de profundidad para la trucha común.

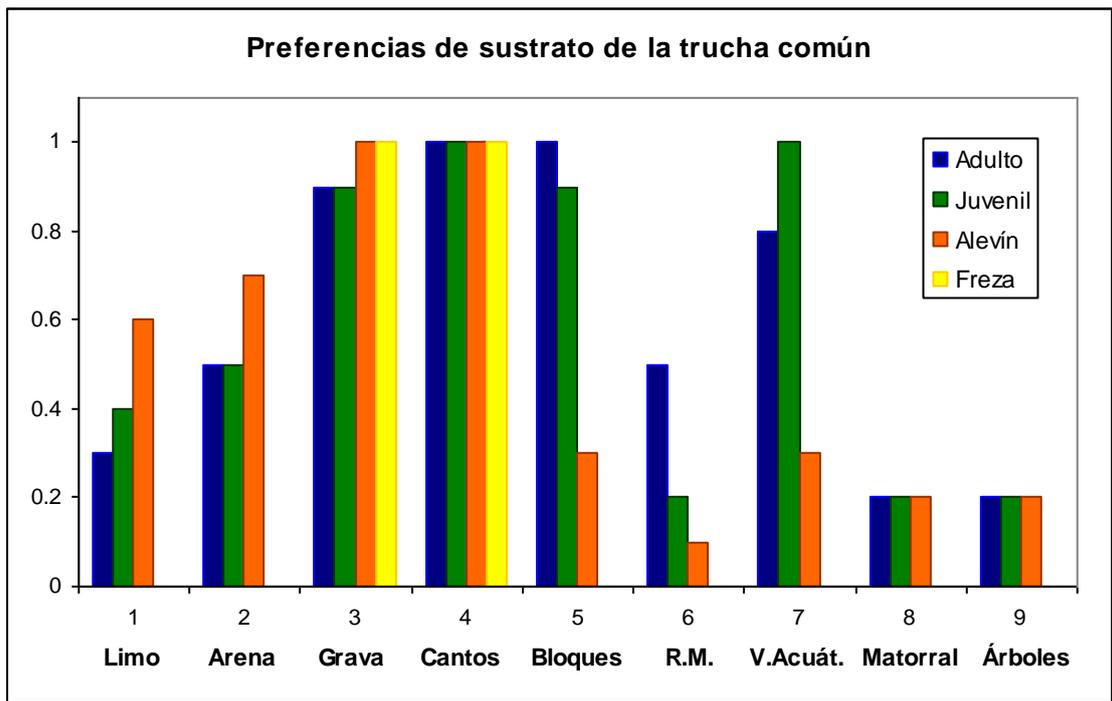


Fig. 2.3. Preferencias de sustrato de la trucha común.

2.5.2. CURVAS DE PREFERENCIA DEL BARBO

Las curvas de preferencia del barbo han sido adaptadas de Martínez Capel (2.000) y son para los estados de adultos, juveniles y alevines.

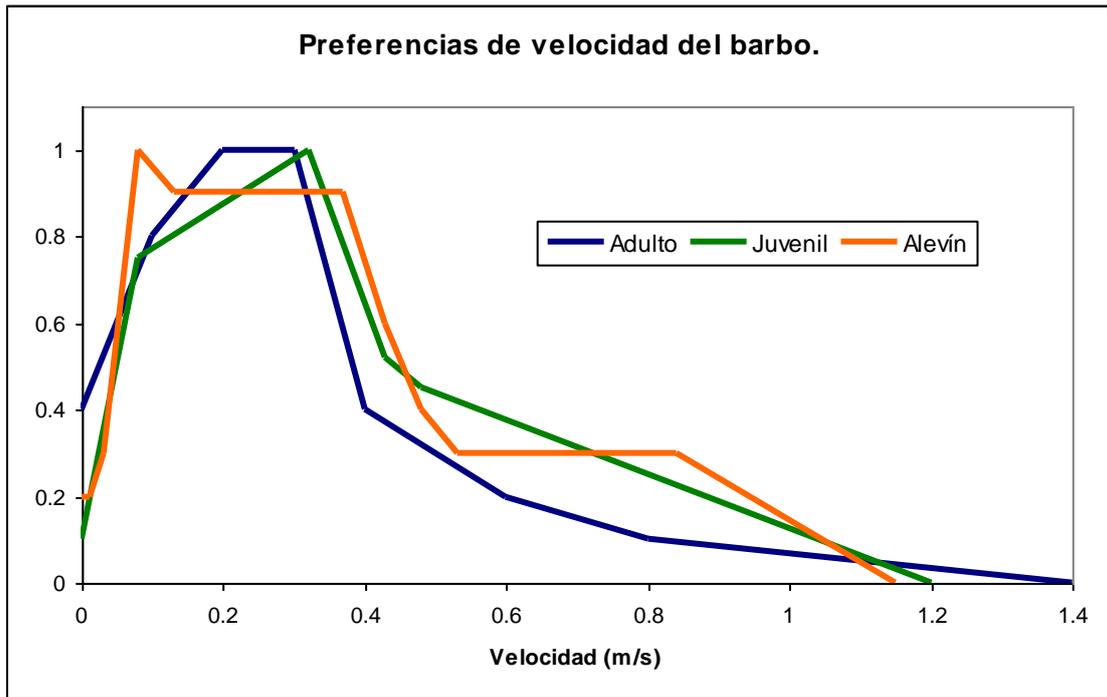


Fig. 2.4. Curvas de preferencia de velocidad del agua para el barbo.

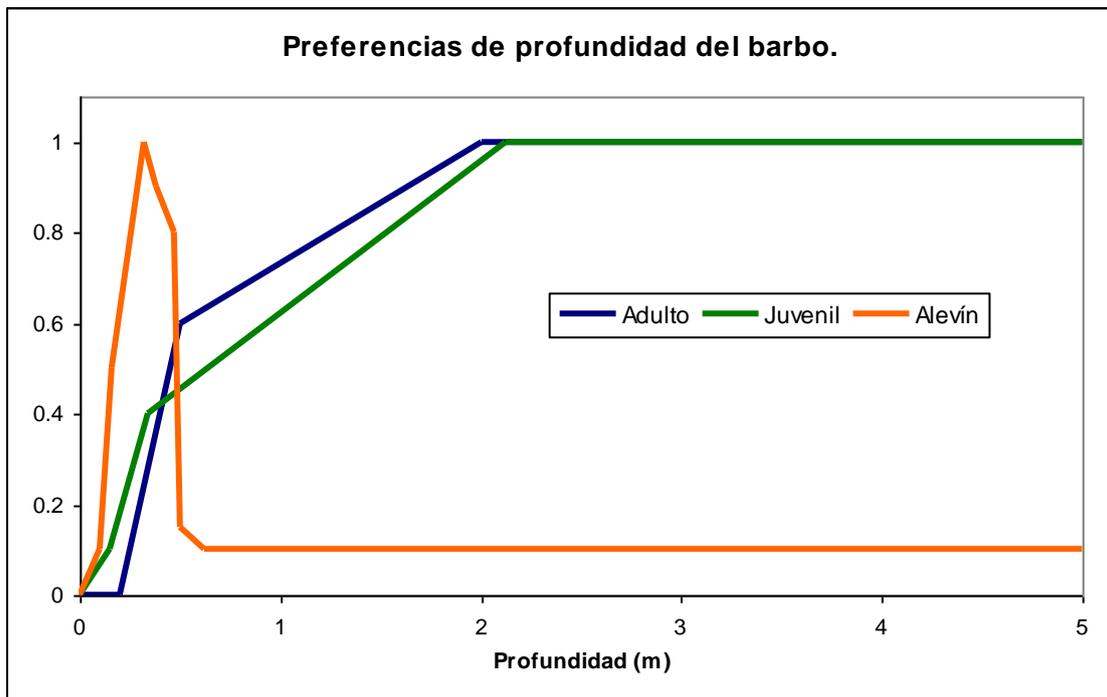


Fig. 2.5. Curvas de preferencia de profundidad para el barbo.

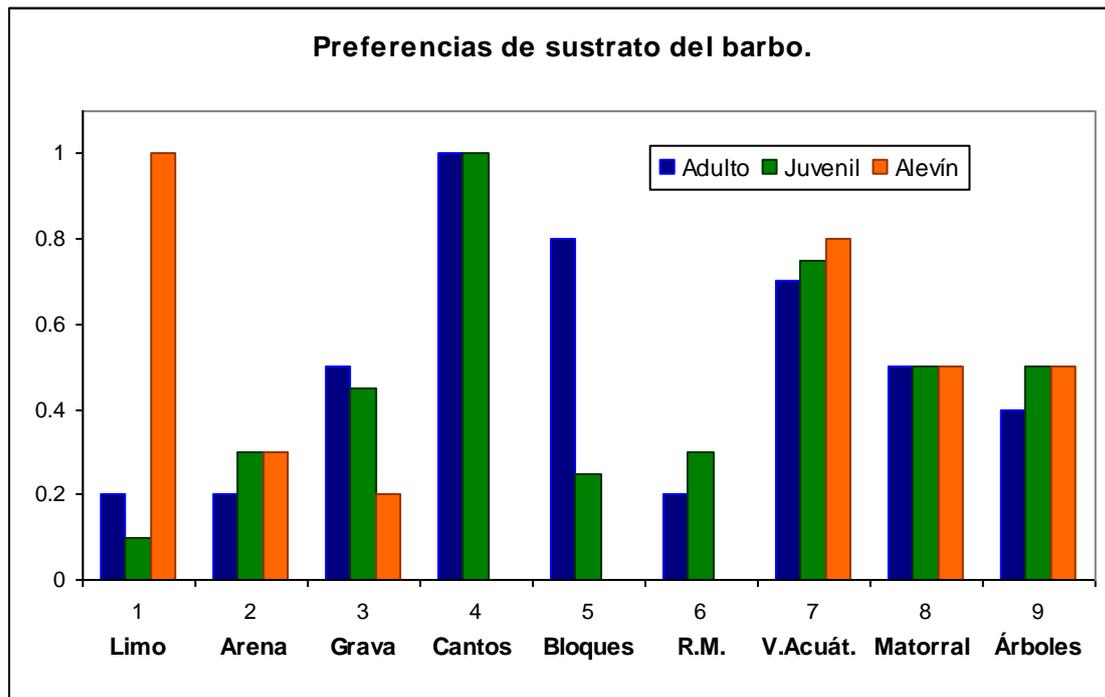


Fig. 2.6. Preferencia de sustrato para el barbo.

2.6. DETERMINACIÓN DEL HÁBITAT POTENCIAL ÚTIL

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 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, profundidad) y características del cauce (sustrato), óptimas para cada especie y estado de vida.

Para cada simulación de un valor supuesto de caudal, el ordenador considera un nivel correspondiente de agua en el río y a partir de esta condición divide el tramo en múltiples celdas, cada una de ellas con una profundidad, velocidad y tipo de granulometría determinadas, según las condiciones de la lámina y la columna de agua de dicho caudal. Mediante las curvas de preferencia, el programa calcula el área o hábitat potencial útil que representa cada una de las celdas consideradas, como producto del llamado índice de conformidad, por el área o superficie real de la celda, mediante la expresión:

$$HPU = C_i \cdot A_{real}$$

donde HPU es el hábitat (en términos de área) potencial útil de cada celda, A_{real} es la superficie real de la celda y C_i es el índice de conformidad de la celda.

El índice de conformidad se puede calcular como la media geométrica de los índices de conformidad obtenidos para cada variable considerada, según la expresión:

$$C_i = \sqrt[3]{C_v \cdot C_h \cdot C_s}$$

siendo:

C_v : índice de conformidad debido a la velocidad.

C_h : índice de conformidad debido a la profundidad.

C_s : índice de conformidad debido al sustrato.

El índice de conformidad de cada una de las variables anteriores se obtendrá a partir de las respectivas funciones de preferencia, entrando en ellas con el valor que, para un determinado caudal, tiene cada una de las variables en cada celda. Realizando este cálculo para distintos caudales, se obtendrán relaciones numéricas que permiten conocer cómo varía el HPU en función de la evolución del caudal.

La elección de las curvas de preferencia que se han aplicado a cada estación de muestreo se ha basado en la composición de la comunidad piscícola presente en cada tramo. De este modo, en C-1, C-2, C-3, C-4 Y C-5, se han empleado las de la trucha común, por ser ésta la única especie presente en estos tramos. En C-6 sólo apareció el barbo gitano, por lo que se han utilizado las curvas de preferencia del barbo.

La idea de unos caudales circulantes mínimos capaces de mantener el funcionamiento del ecosistema fluvial en todos sus niveles se puede plasmar a partir de las gráficas que relacionan el hábitat potencial útil (HPU) con el caudal circulante por el cauce (Q). Por lo tanto, a partir de las relaciones entre los caudales circulantes y los HPU's que se generan en cada tramo, se pueden determinar los caudales ecológicos.

2.7. DETERMINACIÓN DEL HÁBITAT REAL ÚTIL

Tras llevar a cabo la simulación hidráulica con el programa informático RIVER2D y aplicar las funciones de preferencia correspondientes, se obtienen las curvas Caudal-HPU. En los tramos en los que se han aplicado las curvas de preferencia de la trucha común se han obtenido, en cada estación de muestreo, cuatro funciones, una para cada estado de desarrollo de la trucha (adulto, juvenil, alevín y freza). En C-6, donde se han empleado las funciones diseñadas para el barbo, se obtuvieron tres curvas Caudal-HPU, para los estados de adulto, juvenil y alevín.

Debido a la existencia de estas cuatro curvas (o tres, en el caso de C-6), se hace necesario elegir la más limitante para estudiar una sola de las funciones. Para ello debemos ajustarlas de modo que sean comparables, ya que los distintos estados de desarrollo tienen exigencias de hábitat diferentes: no es lo mismo 1 m² de hábitat para la freza, donde puede haber muchos huevos, que 1 m² de hábitat para el adulto, el cual necesita mucho más espacio para desarrollar su actividad vital.

Para ajustar las funciones Caudal-HPU de modo que sean comparables, hemos utilizado las relaciones de hábitat de Bovee (1.982), que se exponen a continuación.

$$\textit{Adulto} \div \textit{Juvenil} = 1/0,8$$

$$\textit{Adulto} \div \textit{Alevín} = 1/0,3$$

$$\textit{Adulto} \div \textit{Freza} = 1/0,2$$

Llamamos Hábitat Real Útil (HRU) al que ha sido ajustado a partir del HPU empleando estas relaciones y que nos permite comparar entre sí las curvas correspondientes a los distintos estados de desarrollo.

Se escoge la curva correspondiente al estado más limitante y se estudia junto con su derivada, que nos informa acerca de cómo varía su pendiente. Se trata ahora de buscar un punto de la curva a partir del cual un aumento de caudal no suponga un incremento significativo del hábitat disponible.

2.8. RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS

La idea de unos caudales mínimos capaces de mantener el funcionamiento del ecosistema fluvial en todos sus niveles, se puede plasmar a partir de las gráficas que relacionan el Hábitat Real Útil (HRU) con el caudal circulante por el cauce.

Sobre las curvas HRU-Caudal se deberán marcar unos caudales básicos. Estos caudales básicos hacen referencia a puntos de estas curvas en los que hay un cambio en la pendiente, es decir, son puntos a partir de los cuales un aumento de caudal no supone un incremento significativo en la superficie de hábitat disponible.

A partir de estos valores de caudal, se deberá escoger el más apropiado teniendo en cuenta diversos criterios: el valor del caudal natural (no tiene sentido proponer un caudal mínimo ecológico que supere al que circula naturalmente); que sigan una pauta lógica en función de la superficie drenada, es decir, que el caudal sea mayor en las estaciones de menor altitud.

Una vez determinado el caudal mínimo ecológico que debe circular por cada tramo del río, deberemos establecer un régimen anual, de modo que el mínimo caudal a mantener no sea siempre el mismo, sino que varíe a lo largo del año de un modo similar a como cambiaría el flujo de forma natural, es decir, si no estuviese sometido a ningún tipo de regulación.

Por lo tanto, utilizaremos el régimen natural de caudales como un patrón cuyas pautas de fluctuación imitará el régimen ecológico que propongamos. A partir de los datos de aforos de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir se evaluarán los caudales medios mensuales y se obtendrá el régimen natural. Aplicando al mes más seco el caudal mínimo obtenido y al resto de los meses unos caudales que varíen del mismo modo que el régimen natural, estableceremos el régimen de caudales ecológicos.

3. RESULTADOS

3.1. TOPOGRAFÍA Y CAUDAL CIRCULANTE

Las estaciones de muestreo que han sido estudiadas para la realización del presente trabajo, aparecen descritas con detalle en el apartado Metodología. En las figuras 3.1 a 3.6 se representa la topografía obtenida en los trabajos de campo. En ellas se puede ver la planta de los seis tramos con la elevación del terreno y los puntos tomados con la estación total.

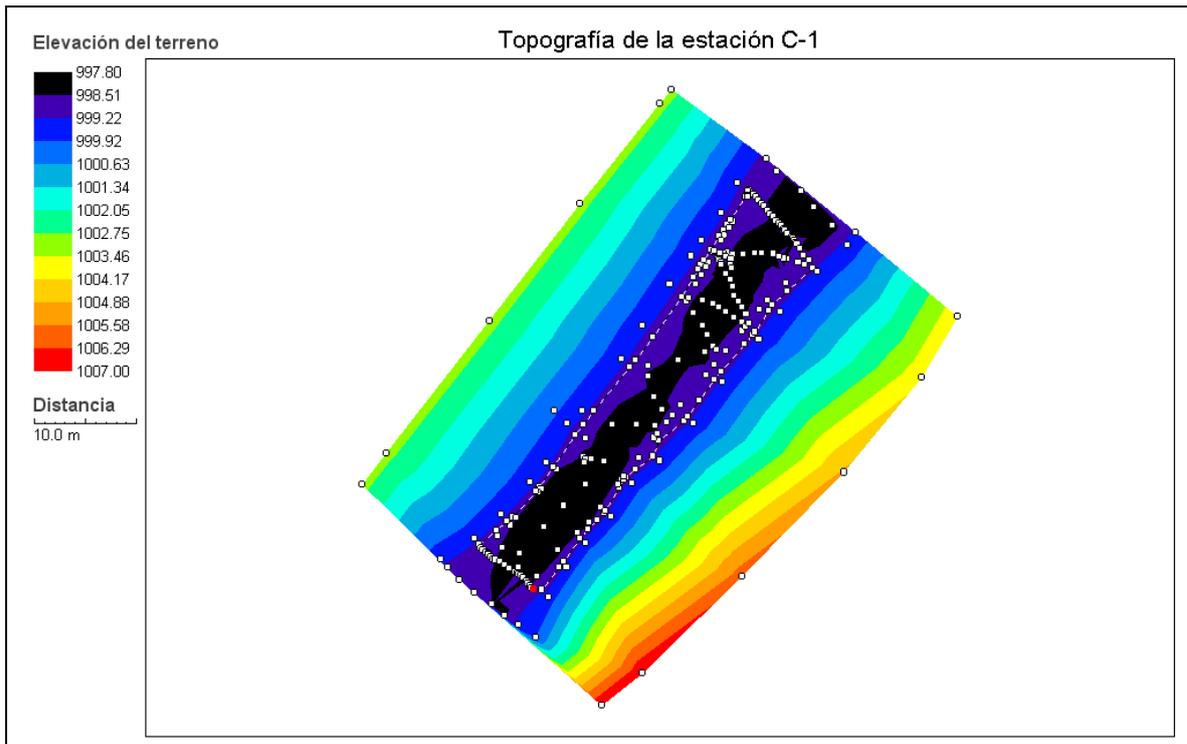


Figura 3.1. Planta de la estación C-1 (Los Inhiestares)

La estación C-1 es un tramo recto, cercano al nacimiento, con una longitud de unos 136 metros y una anchura de algo más de 6 m.

C-2 es el tramo de río afectado por la regulación de caudal de la minicentral. Se trata de una estación de fuerte pendiente, con un caudal muy escaso durante todo el año y con una granulometría en la que predominan los grandes bloques. Tiene una longitud de poco más de 40 metros y una anchura muy variable.

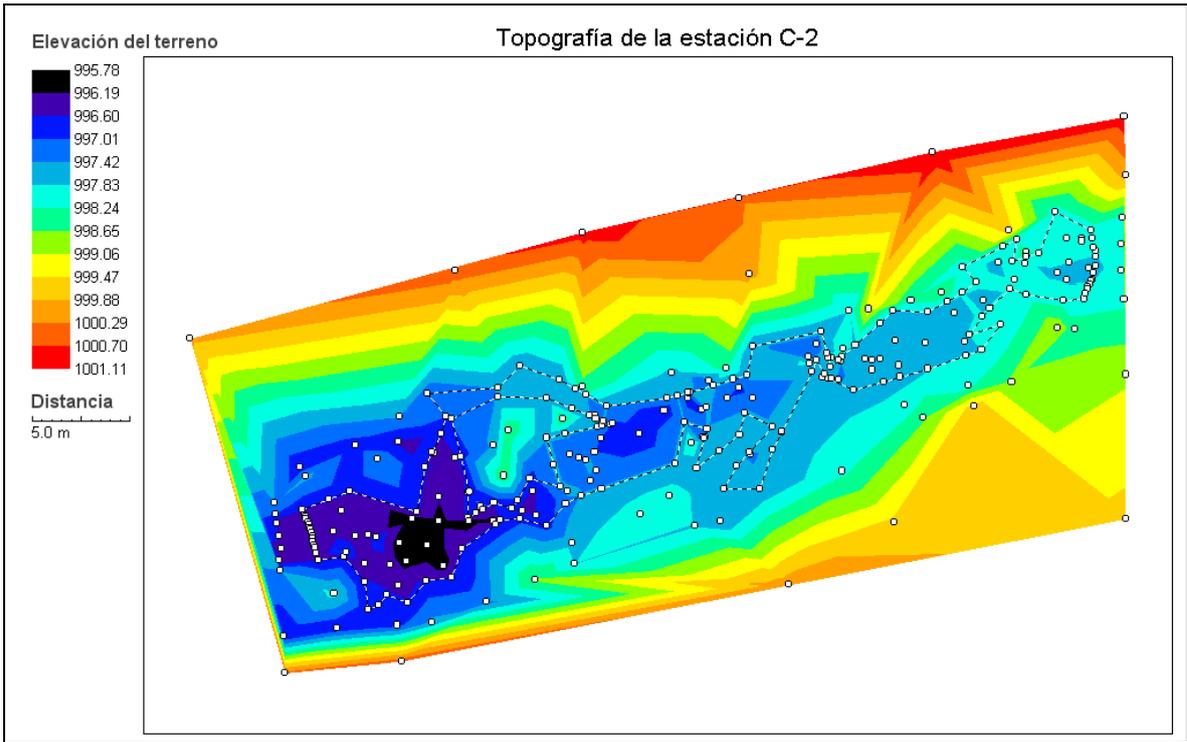


Figura 3.2. Planta de la estación C-2 (La minicentral)

La estación C-3 es un tramo curvo, de aguas bastante rápidas. Su longitud es de unos 50 m y su anchura media es de 7 m.

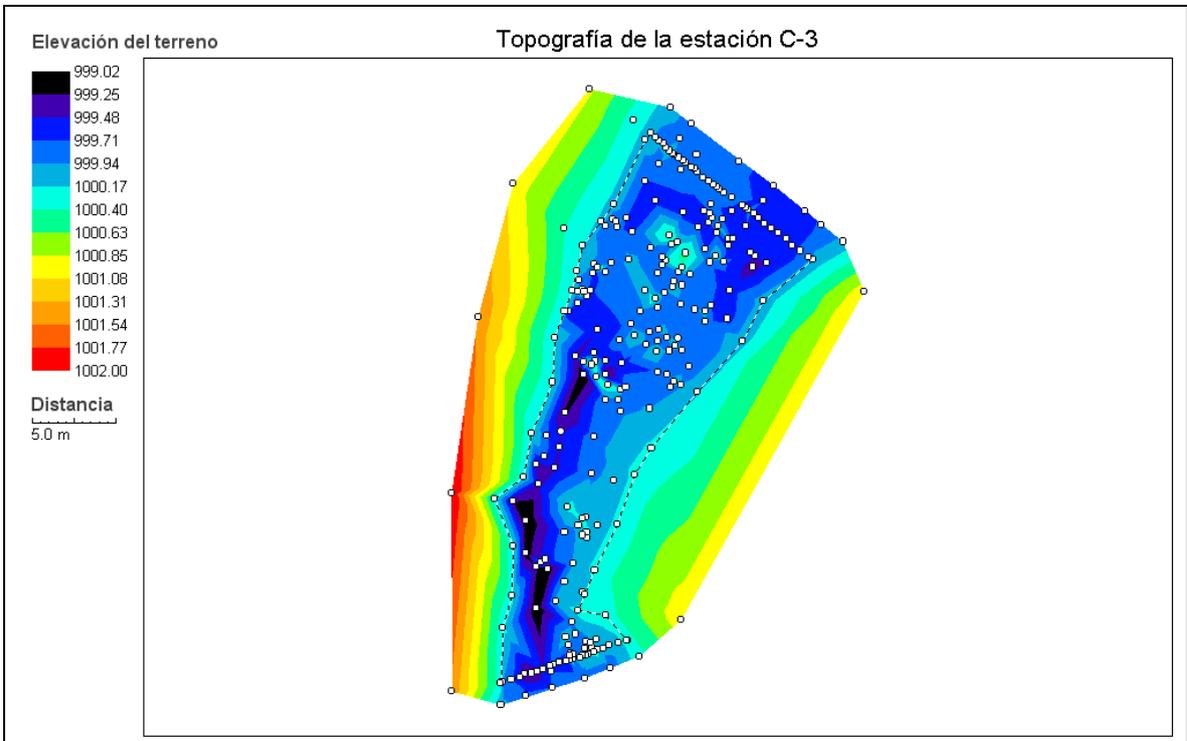


Figura 3.3. Planta de la estación C-3 (Cortijo de la Saludada)

La estación del Puente de Lézar es un tramo curvo, muy cercano a la cola del embalse, que presenta un talud de roca madre, de fuerte pendiente, en su orilla derecha aguas abajo. Mide 70 m de largo y unos 8 m de anchura.

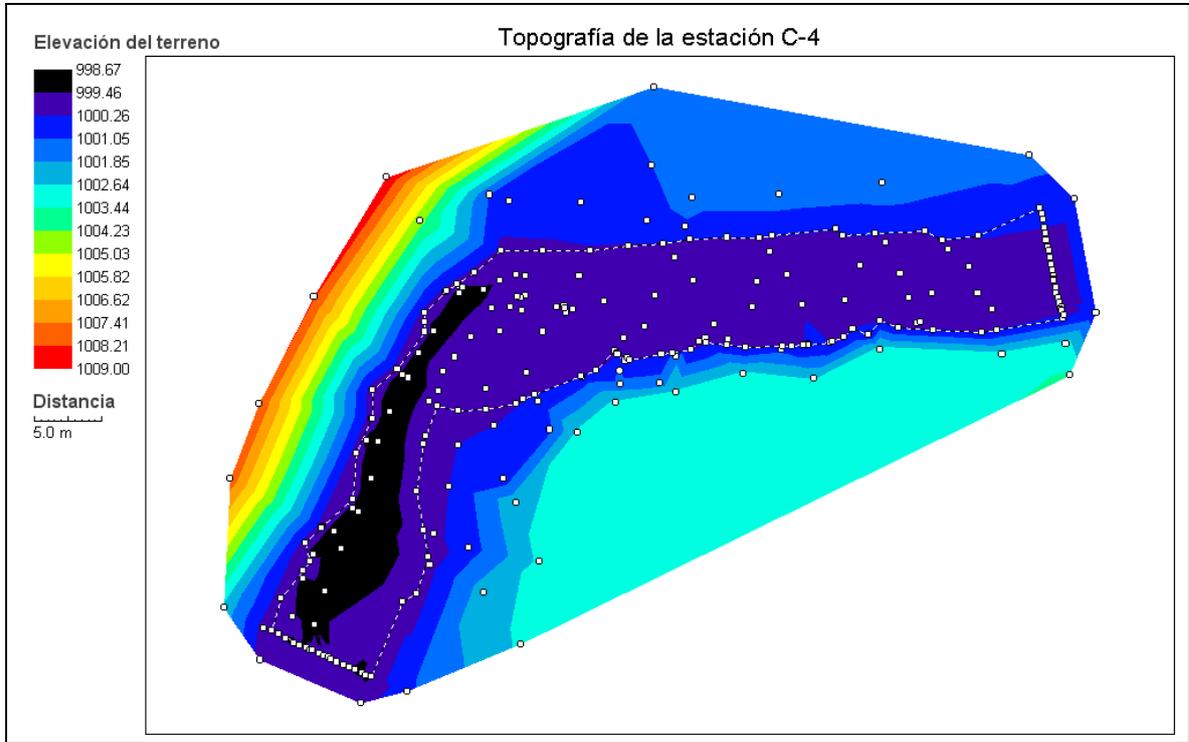


Figura 3.4. Planta de la estación C-4 (Puente de Lézar)

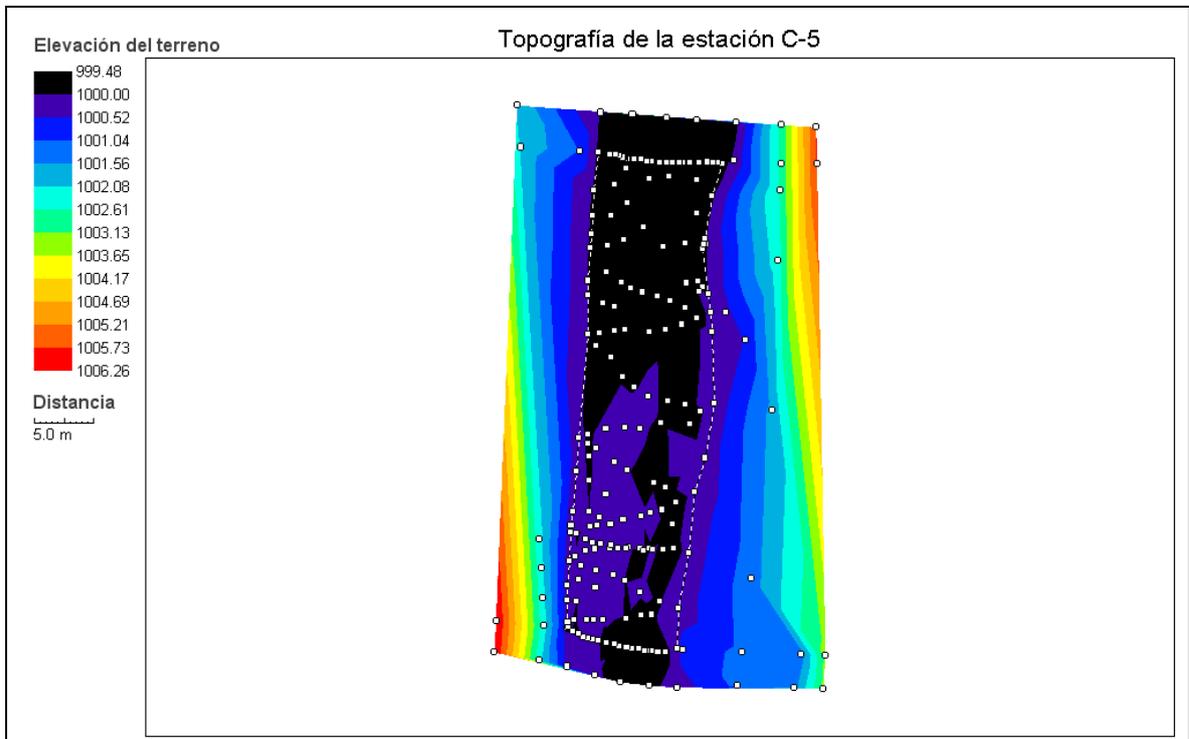


Figura 3.5. Planta de la estación C-5 (Castril)

La estación de muestreo C-5 es un tramo recto que se sitúa justo aguas abajo de la suelta de agua del embalse de El Portillo. Tiene casi 10 m de ancho y casi 50 de longitud.

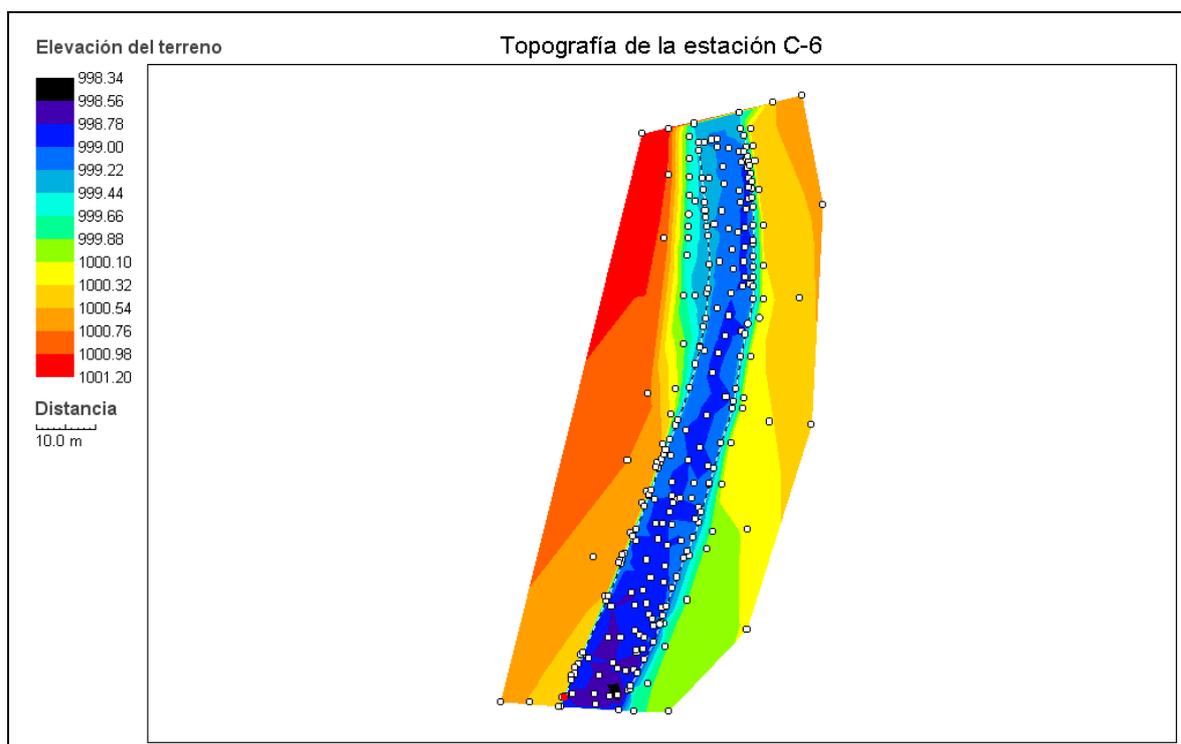


Figura 3.6. Planta de la estación C-6 (Los Laneros)

En la estación de Los Laneros, la más baja de las contempladas en este estudio, el agua lleva gran cantidad de elementos finos en suspensión. Es una curva suave de 100 m de longitud y 8 m de anchura.

En la tabla 3.1 se exponen los valores de caudal aforados en cada una de las dos campañas de muestreo, así como las cotas de la lámina de agua, aguas arriba y aguas abajo.

Tabla 3.1. Elevación de la lámina de agua y caudal en el momento del muestreo.

Estación	Caudal (m ³ /s)		Altura de entrada (m)	Altura de salida (m)
	Jun '01	Ene '02	Jun '01	Jun '01
C-1	0,81	0,68	998,96	998,94
C-2	0,05	0,01	998,03	996,64
C-3	1,24	1,03	1000,25	1000,02
C-4	1,34	0,98	1000,41	999,84
C-5	0,56	1,36	1000,25	999,91
C-6	1,37	1,5	999,41	998,95

En la estación C-2 el caudal es muy bajo a causa de la influencia de la minicentral. Se observa que en C-5, durante el muestreo de junio, el caudal fue también bastante bajo. Esto es debido a que el embalse de El Portillo, situado justo aguas arriba de esta estación, suelta su agua por dos puntos diferentes, formándose dos cauces que se unen algo más abajo de C-5, situándose nuestra estación en el izquierdo. En junio el agua corría por ambos cauces, mientras que en la campaña de enero, el embalse estaba soltando prácticamente todo el agua por el cauce izquierdo.

3.2. SIMULACIÓN HIDRÁULICA

En cada tramo estudiado la simulación ha sido realizada con diferentes valores de caudal, considerando incrementos sucesivos de caudal dentro del rango que aparece en el eje de abscisas de las figuras 3.17 a 3.21.

Con dicha simulación se puede visualizar de manera gráfica la evolución del nivel de las aguas, la inundación progresiva de las orillas y, lo que es más importante, el modo en que varía la velocidad y la profundidad del agua en cada una de las celdas establecidas por el modelo. Así se puede conocer posteriormente, mediante la aplicación de las funciones de preferencia, qué área del tramo es susceptible de ser habitada por las especies estudiadas.

Como ejemplo de la simulación hidráulica se expone, en las figuras 3.7 a 3.11, la planta de las estaciones de muestreo, con los resultados obtenidos por el programa RIVER-2D en cuanto a profundidad (representada por colores) y velocidad del agua (por vectores), para el caudal que llevaba en el río durante la primera campaña.

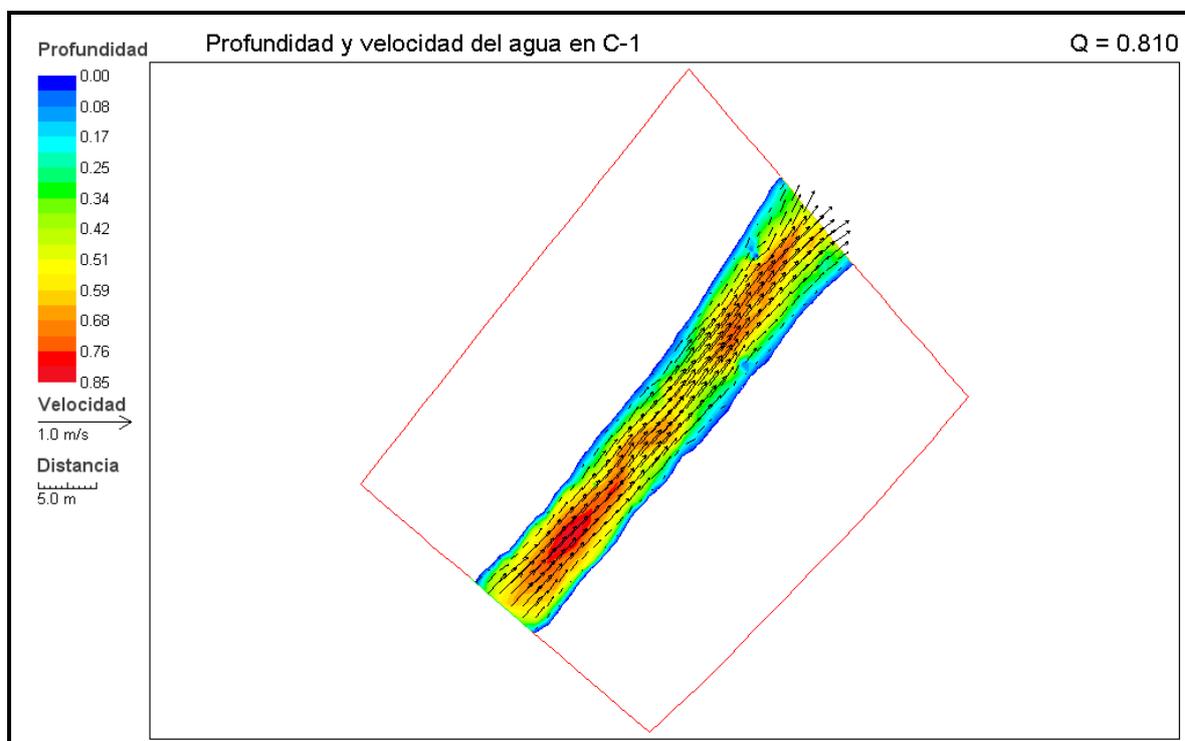


Figura 3.7. Distribución de profundidades (en colores) y velocidades del agua (vectores) en la estación C-1, para un caudal de $0,81 \text{ m}^3/\text{s}$ (medido durante la primera campaña).

La estación de muestreo C-2 planteó serias dificultades para llevar a cabo la simulación. El caudal circulante era tan pequeño y la topografía tan compleja, que el programa RIVER-2D no fue capaz de realizar la simulación correctamente, por lo que no existen resultados de este tramo.

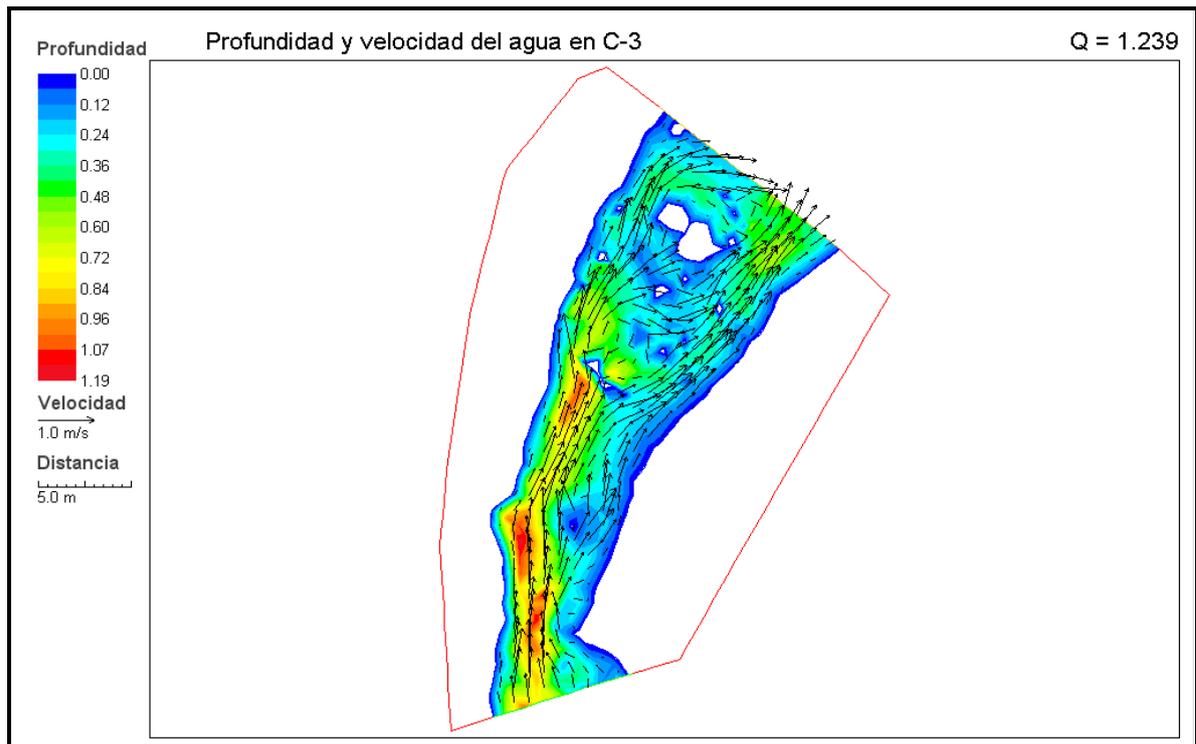


Figura 3.8. Distribución de profundidades (en colores) y velocidades del agua (vectores) en la estación C-3, para un caudal de $1,239 \text{ m}^3/\text{s}$ (medido durante la primera campaña).

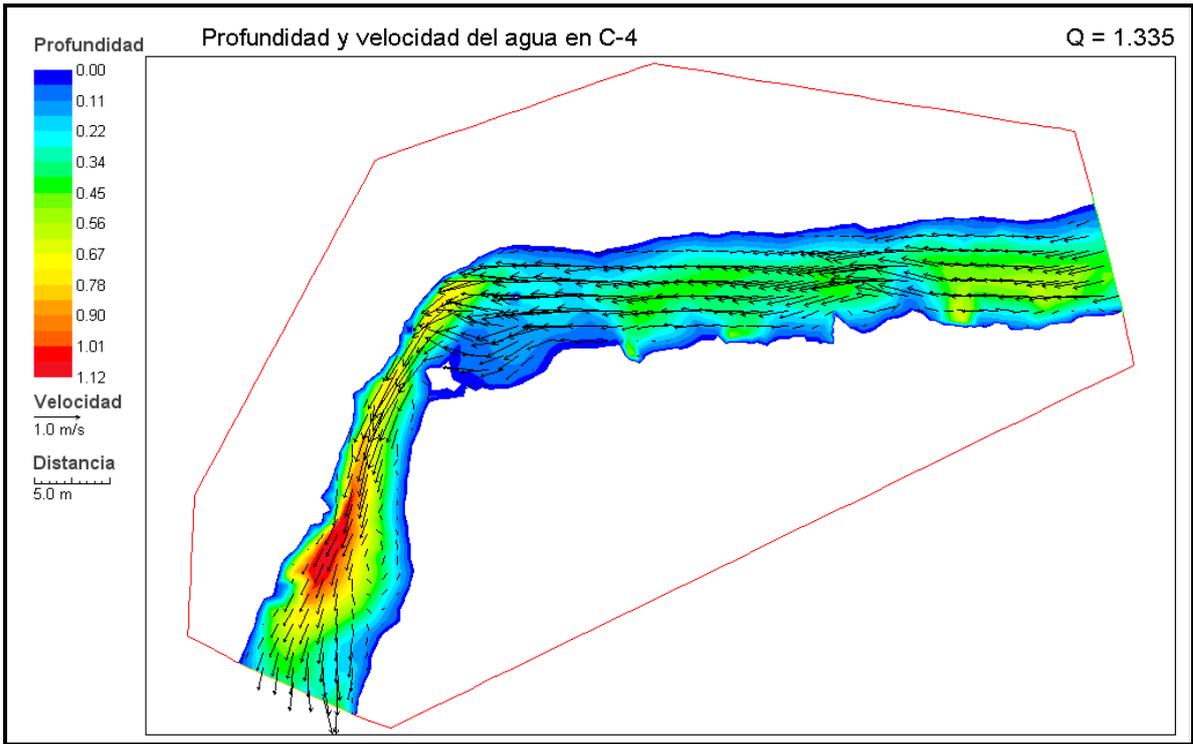


Figura 3.9. Distribución de profundidades (en colores) y velocidades del agua (vectores) en la estación C-4, para un caudal de $1,335 \text{ m}^3/\text{s}$ (medido durante la primera campaña).

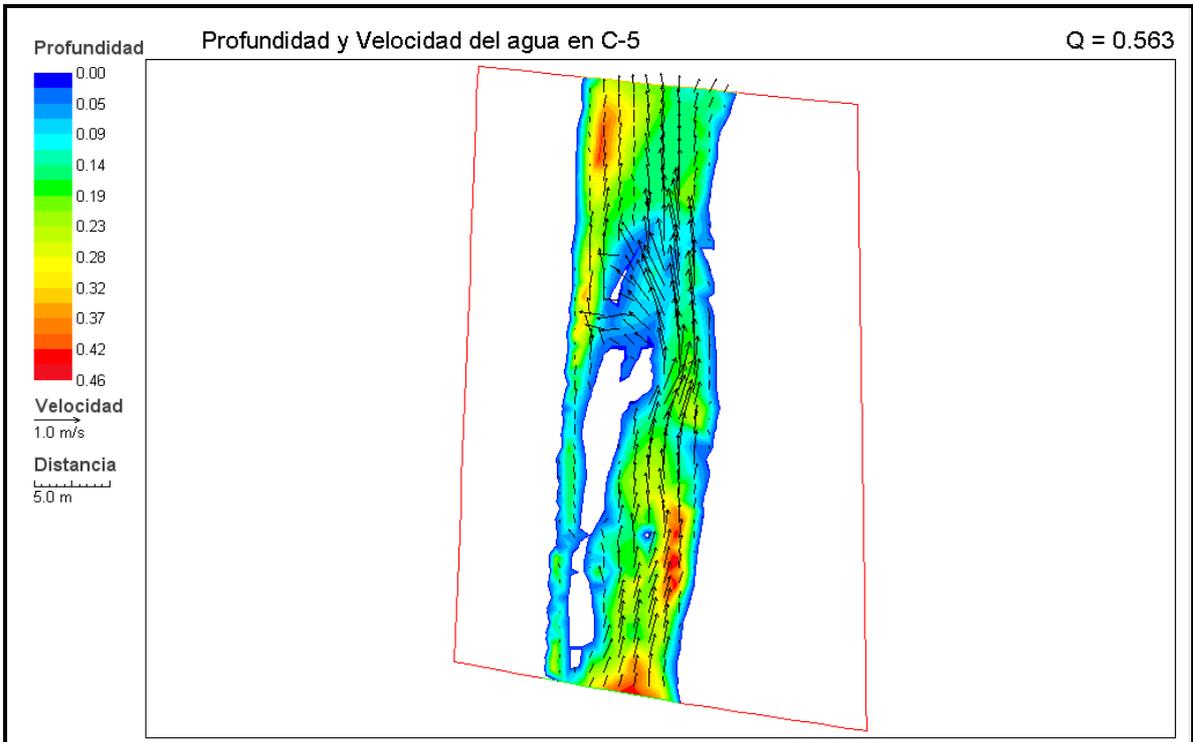


Figura 3.10. Distribución de profundidades (en colores) y velocidades del agua (vectores) en la estación C-5, para un caudal de $0,563 \text{ m}^3/\text{s}$ (medido durante la primera campaña).

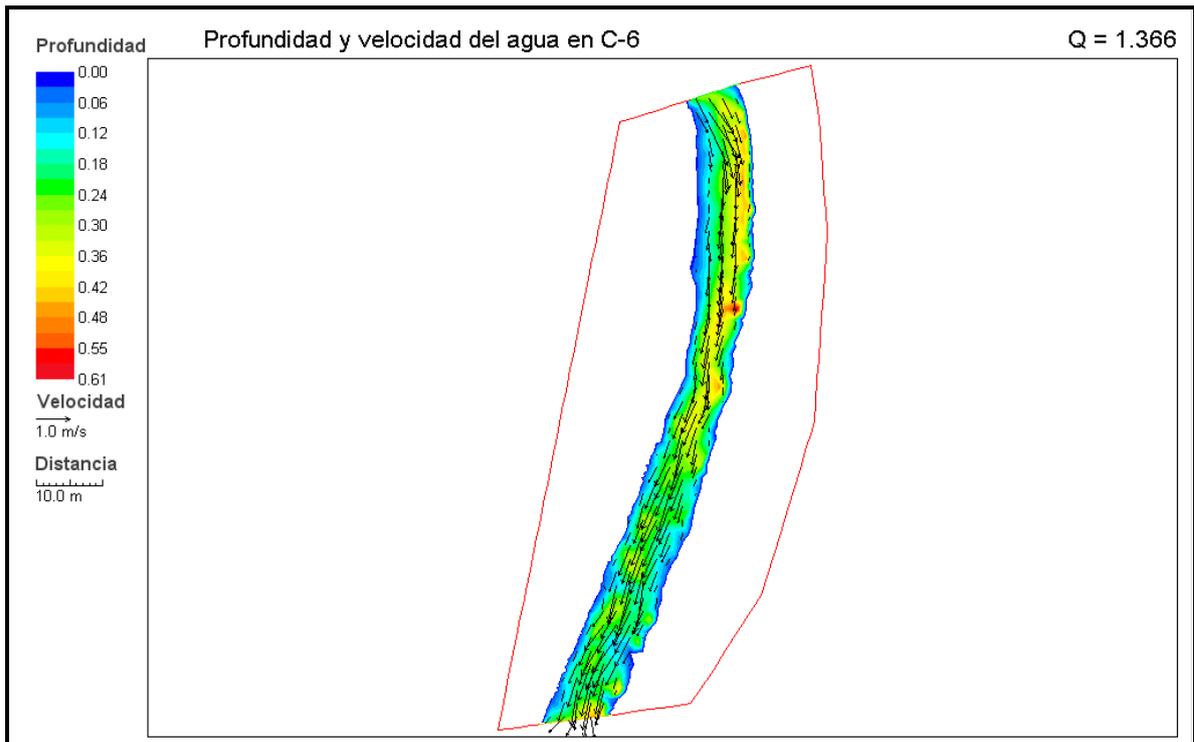


Figura 3.11. Distribución de profundidades (en colores) y velocidades del agua (vectores) en la estación C-6, para un caudal de $1,366 \text{ m}^3/\text{s}$ (medido durante la primera campaña).

3.3. ESTIMACIÓN DEL HÁBITAT POTENCIAL ÚTIL

Una vez realizada la simulación, el programa RIVER-2D permite incorporar las curvas de preferencia de las distintas especies consideradas, con el objeto de estimar la superficie de Hábitat Potencial Útil existente para esas especies. Esto permite ver cómo se modifican las condiciones del cauce respecto a los requerimientos de las especies, en función de los distintos caudales simulados.

En las figuras 3.12 a 3.16 se ilustra, a modo de ejemplo, la variación de la distribución del Hábitat Potencial Útil (HPU) en cada tramo, bajo las condiciones de dos caudales circulantes distintos. El valor de HPU correspondiente a 0 significa que en esa celda la especie considerada no puede habitar, mientras que los sucesivos valores crecientes de HPU indican el grado de adecuación de la celda para dicha especie, atendiendo a sus curvas de preferencia, correspondiendo el valor 1 al hábitat óptimo. El HPU cuya distribución espacial se representa en estos planos corresponde al estado de adulto.

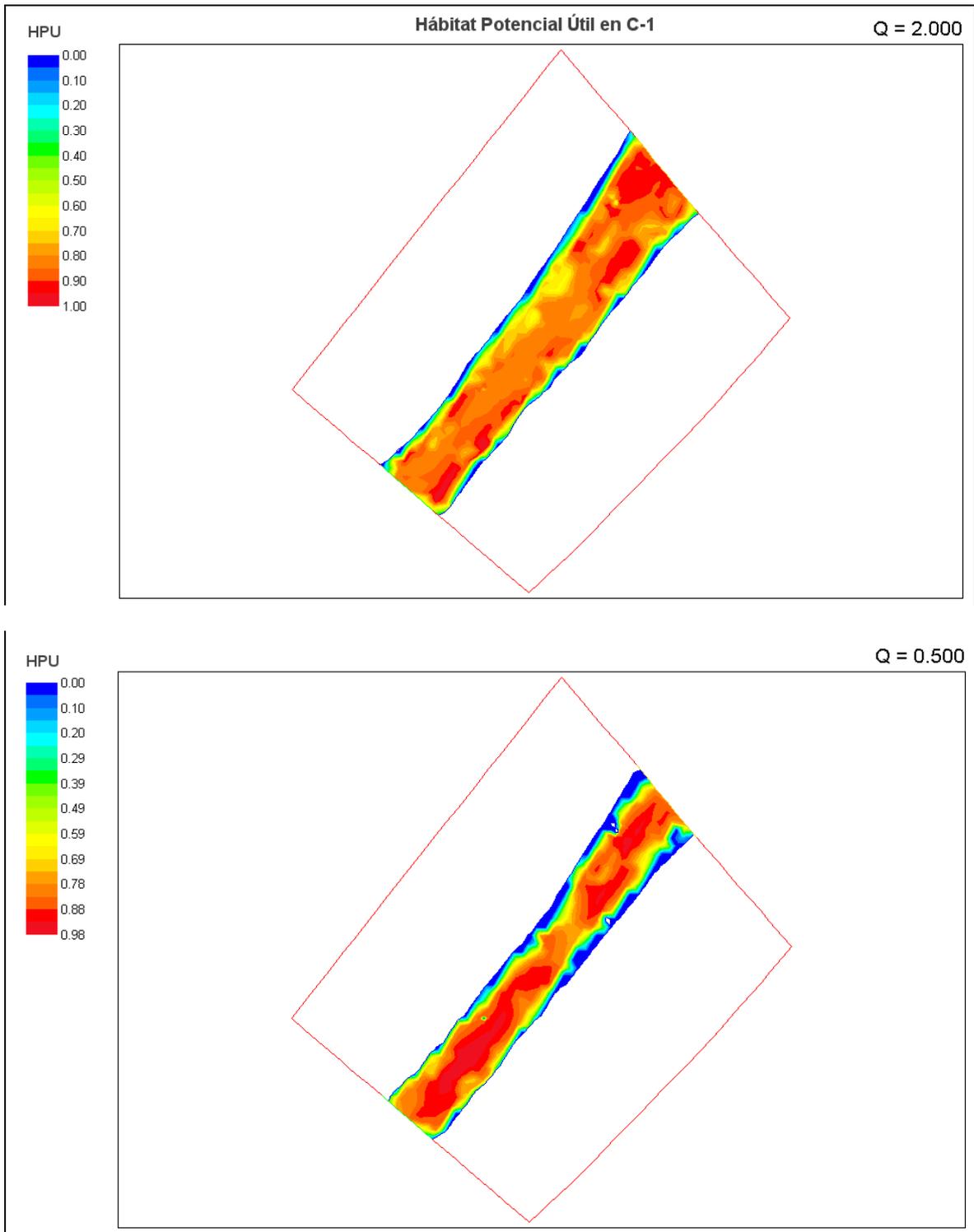


Fig. 3.12. Planos de Estación C-1 que representan dos simulaciones diferentes: un caudal alto ($2 \text{ m}^3/\text{s}$) y otro bajo ($0,5 \text{ m}^3/\text{s}$); en los que se refleja la distribución de Hábitat Potencial Útil para el adulto de trucha.

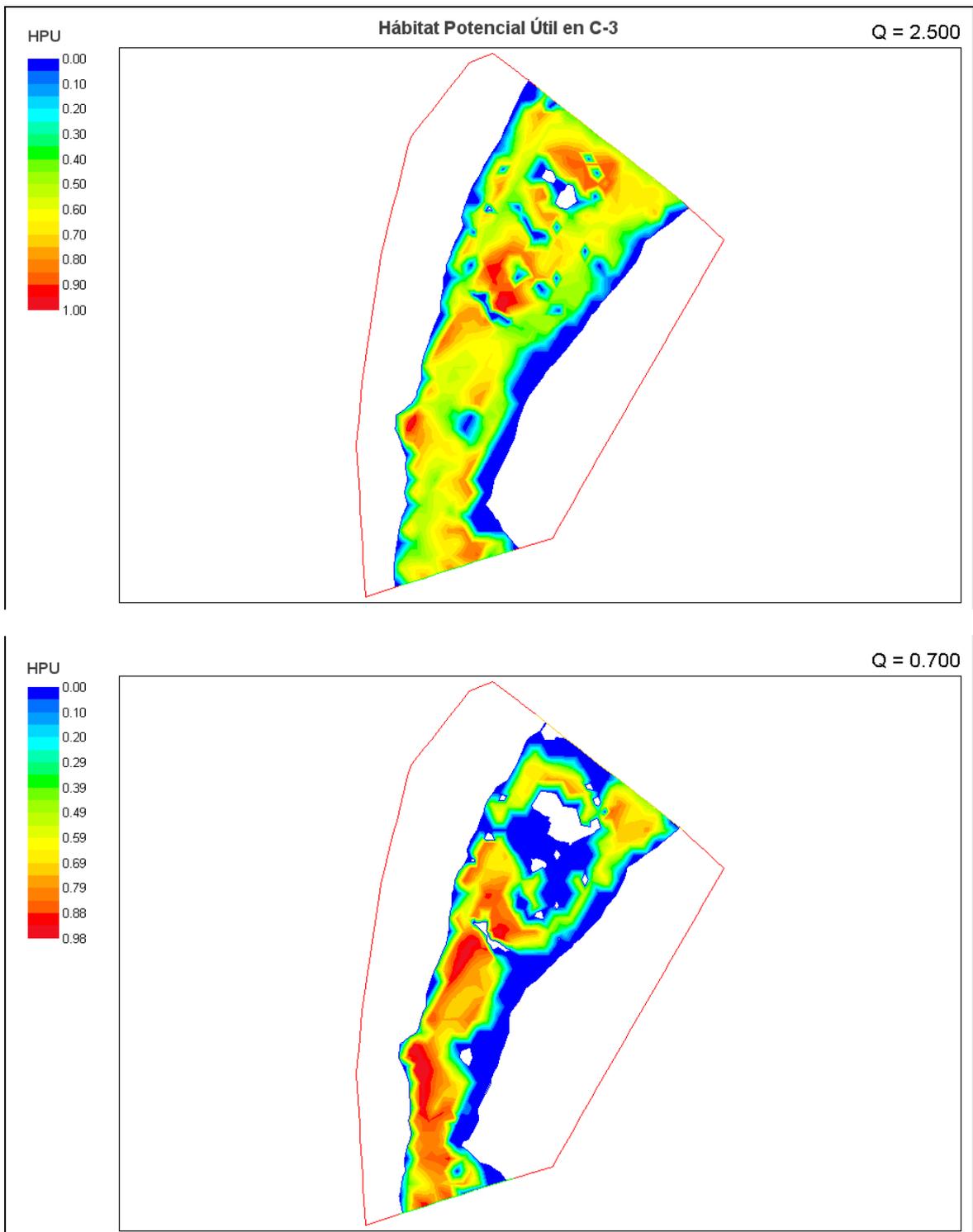


Fig. 3.13. Planos de Estación C-3 que representan dos simulaciones diferentes: un caudal alto ($2,5 \text{ m}^3/\text{s}$) y otro bajo ($0,7 \text{ m}^3/\text{s}$); en los que se refleja la distribución de Hábitat Potencial Útil para el adulto de trucha.

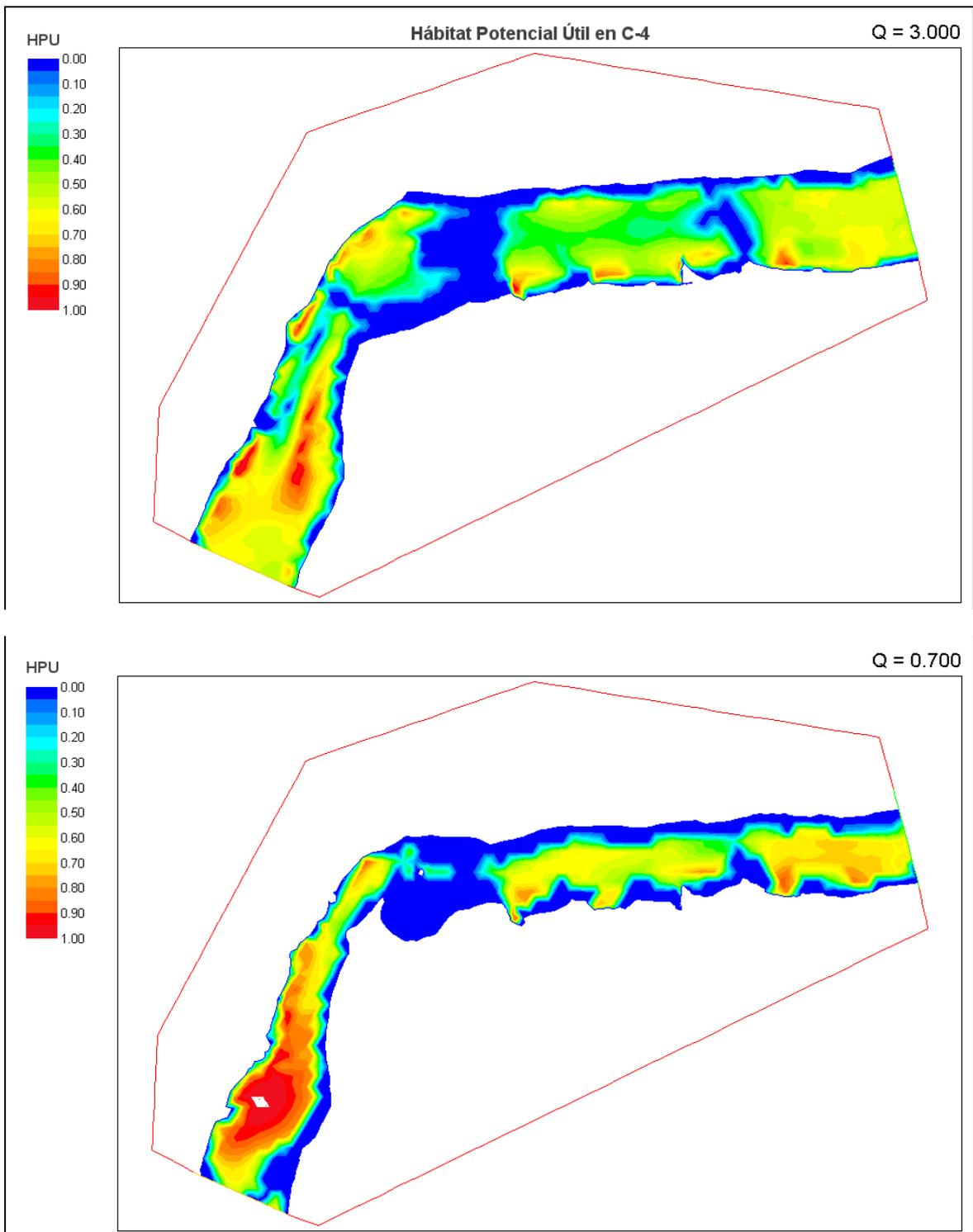


Fig. 3.14. Planos de Estación C-4 que representan dos simulaciones diferentes: un caudal alto ($3 \text{ m}^3/\text{s}$) y otro bajo ($0,7 \text{ m}^3/\text{s}$); en los que se refleja la distribución de Hábitat Potencial Útil para el adulto de trucha.

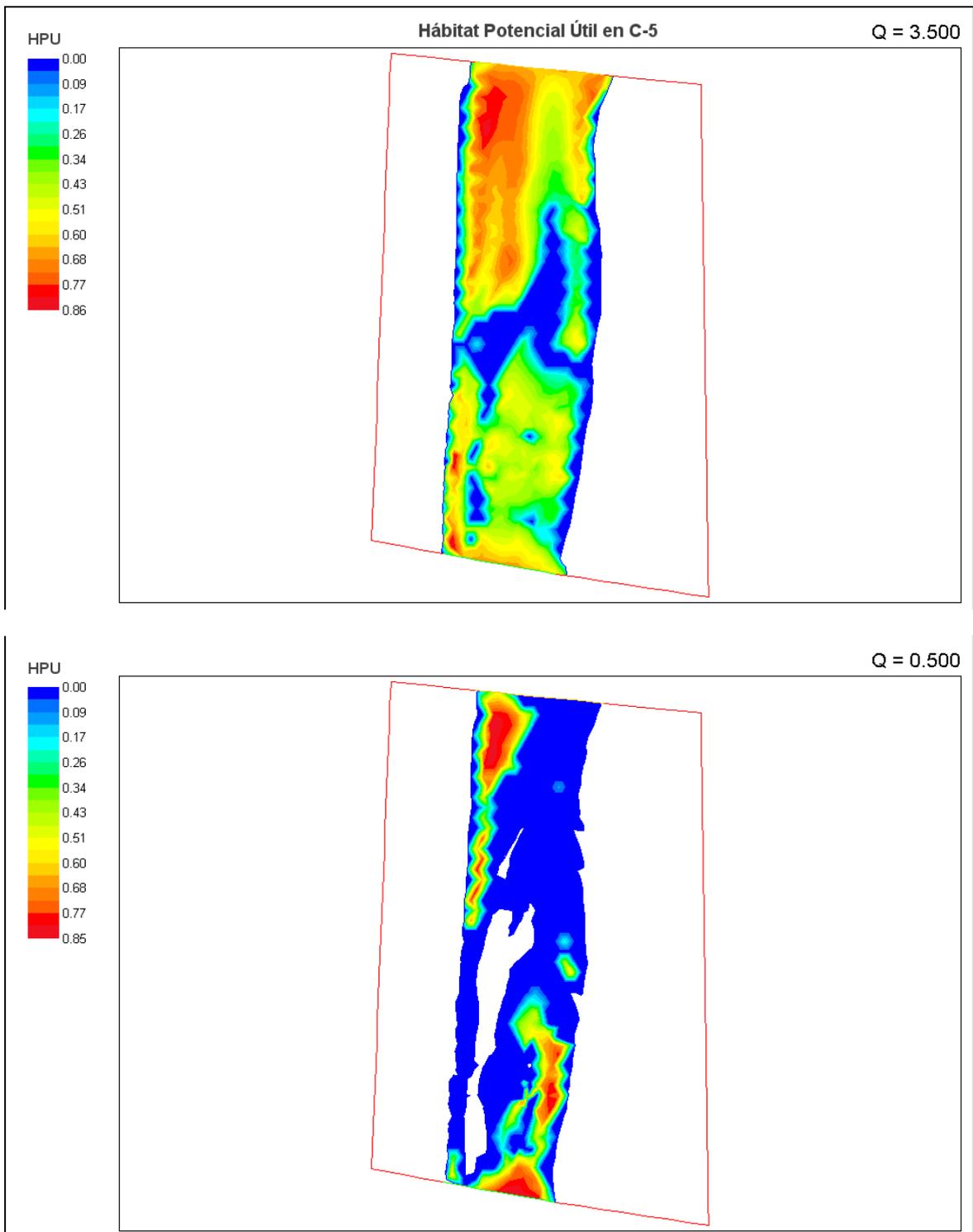


Fig. 3.15. Planos de Estación C-5 que representan dos simulaciones diferentes: un caudal alto ($3,5 \text{ m}^3/\text{s}$) y otro bajo ($0,5 \text{ m}^3/\text{s}$); en los que se refleja la distribución de Hábitat Potencial Útil para el adulto de trucha.

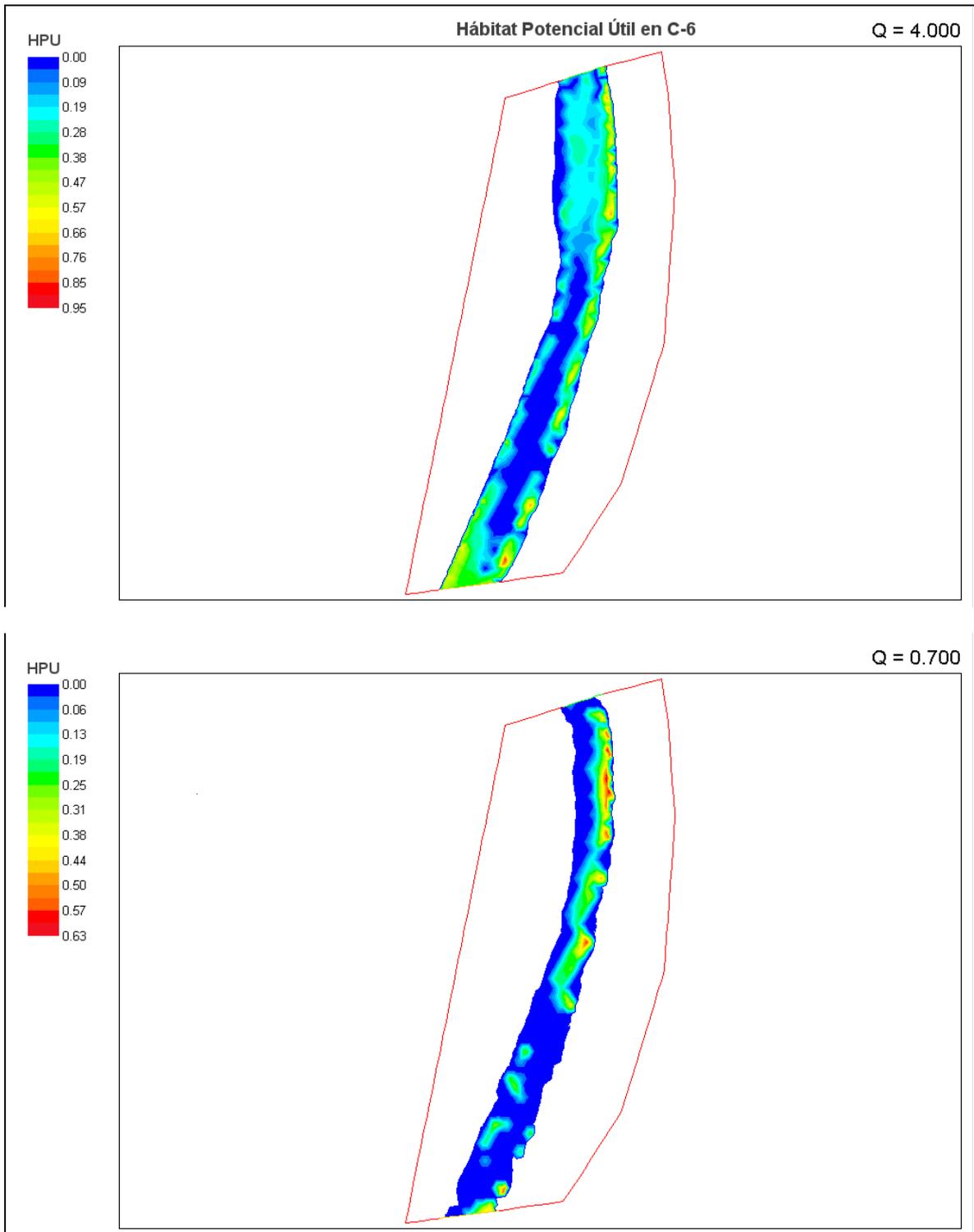


Fig. 3.16. Planos de Estación C-6 que representan dos simulaciones diferentes: un caudal alto ($4 \text{ m}^3/\text{s}$) y otro bajo ($0,7 \text{ m}^3/\text{s}$); en los que se refleja la distribución de Hábitat Potencial Útil para el barbo adulto.

Una vez realizada la simulación en cada estación y teniendo en cuenta las funciones de preferencia de cada estado de desarrollo de la especie considerada, se obtienen las curvas que relacionan el caudal circulante con el hábitat disponible en cada tramo. Estas gráficas HPU-Caudal se presentan en las figuras 3.17 a 3.21.

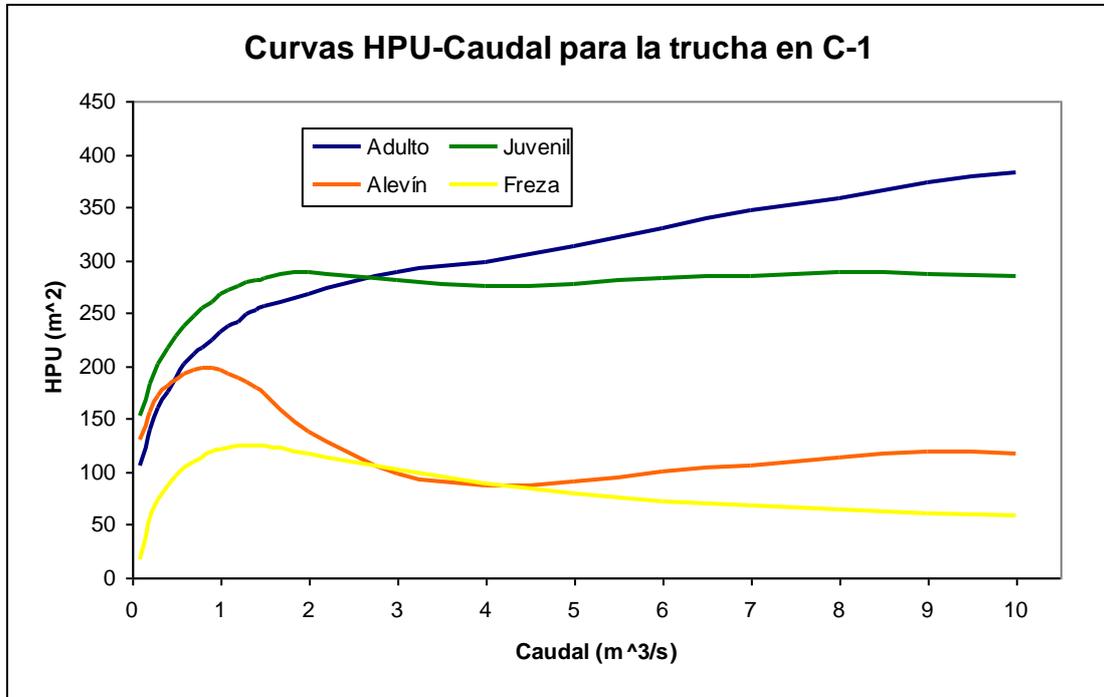


Fig 3.17. Curvas de fluctuación del hábitat potencial útil en función del caudal circulante, para los cuatro estados de desarrollo de la trucha, en C-1.

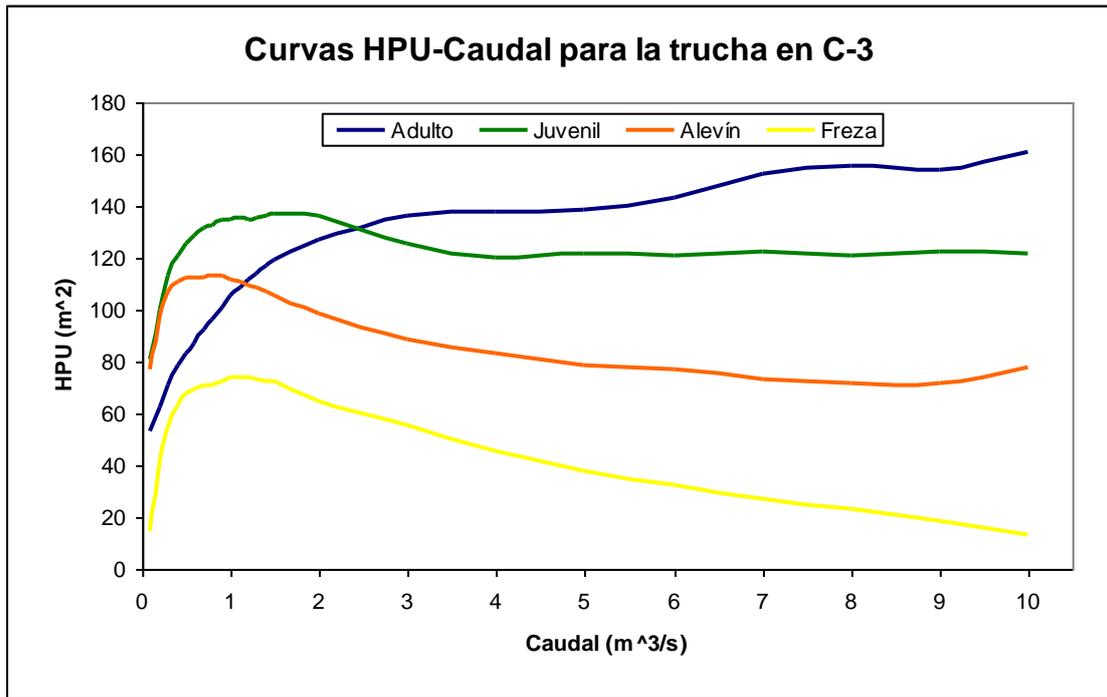


Fig 3.18. Curvas de fluctuación del hábitat potencial útil en función del caudal circulante, para los cuatro estados de desarrollo de la trucha, en C-3.

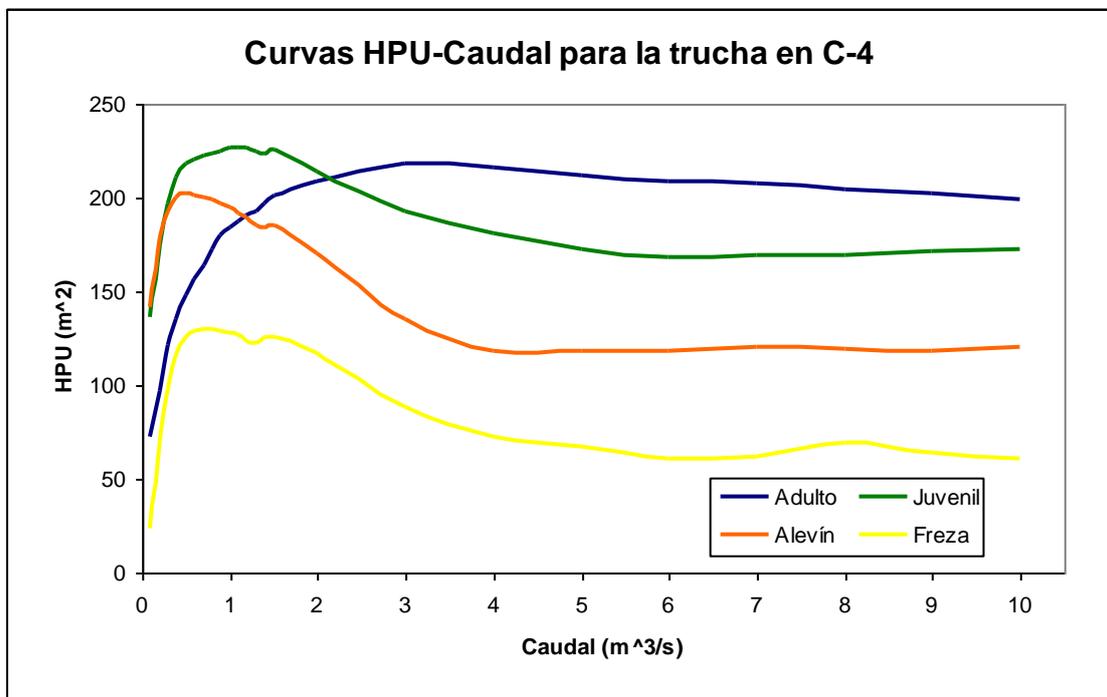


Fig 3.19. Curvas de fluctuación del hábitat potencial útil en función del caudal circulante, para los cuatro estados de desarrollo de la trucha, en C-4.

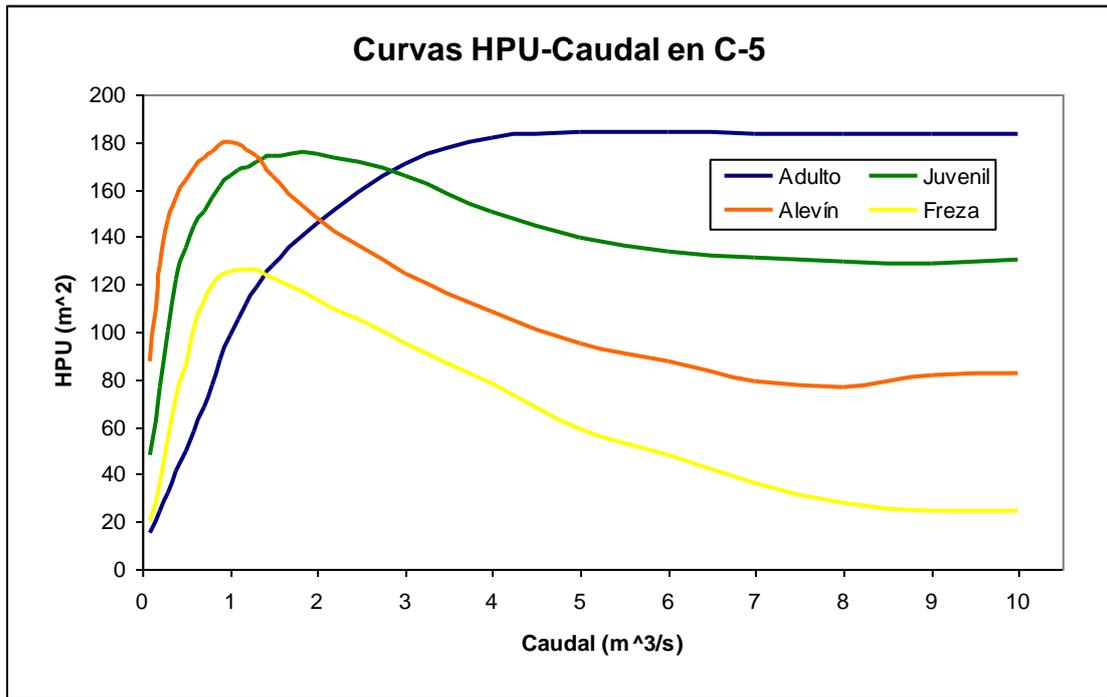


Fig 3.20. Curvas de fluctuación del hábitat potencial útil en función del caudal circulante, para los cuatro estados de desarrollo de la trucha, en C-5.

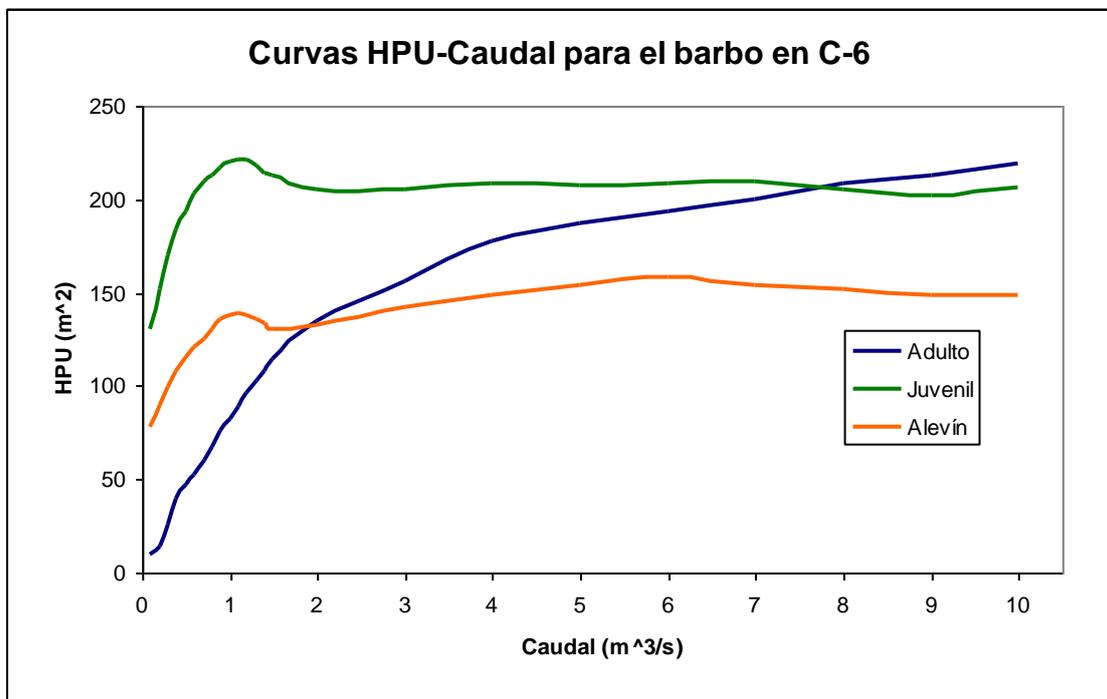


Fig 3.21. Curvas de fluctuación del hábitat potencial útil en función del caudal circulante, para los tres estados de desarrollo del barbo, en C-6.

3.4. CURVAS HÁBITAT REAL ÚTIL-CAUDAL

Como ya se explicó en la Metodología, no podemos comparar directamente estas curvas entre sí, ya que los diferentes estados de desarrollo no tienen las mismas exigencias en cuanto al tamaño de su hábitat: un solo adulto necesita mucho más territorio para vivir que un alevín. Para ajustar estas curvas y que sean comparables entre sí, hemos empleado las relaciones que da Bovee (1.982), que son las siguientes:

$$\text{Adulto} \div \text{Juvenil} = 1/0,8$$

$$\text{Adulto} \div \text{Alevín} = 1/0,3$$

$$\text{Adulto} \div \text{Freza} = 1/0,2$$

Llamamos Hábitat Real Útil (HRU), a la superficie de hábitat (en m²) existente para cada estado de desarrollo, de modo que sea comparable con el del adulto. A continuación, en las figuras 3.22 a 3.26, se presentan las curvas HRU-Caudal, obtenidas mediante la aplicación al HPU de las relaciones anteriores. Estas gráficas nos permiten ver cuál es el estado vital más limitante.

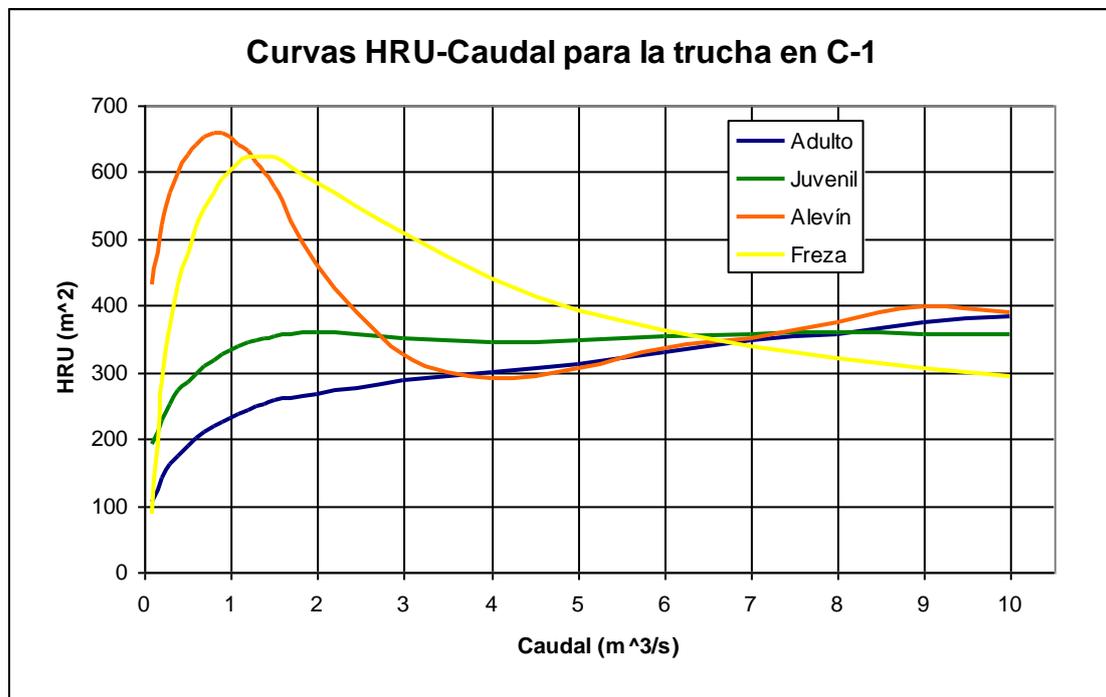


Fig 3.22. Curvas de fluctuación del hábitat real útil en función del caudal circulante, para los cuatro estados de desarrollo de la trucha, en C-1.

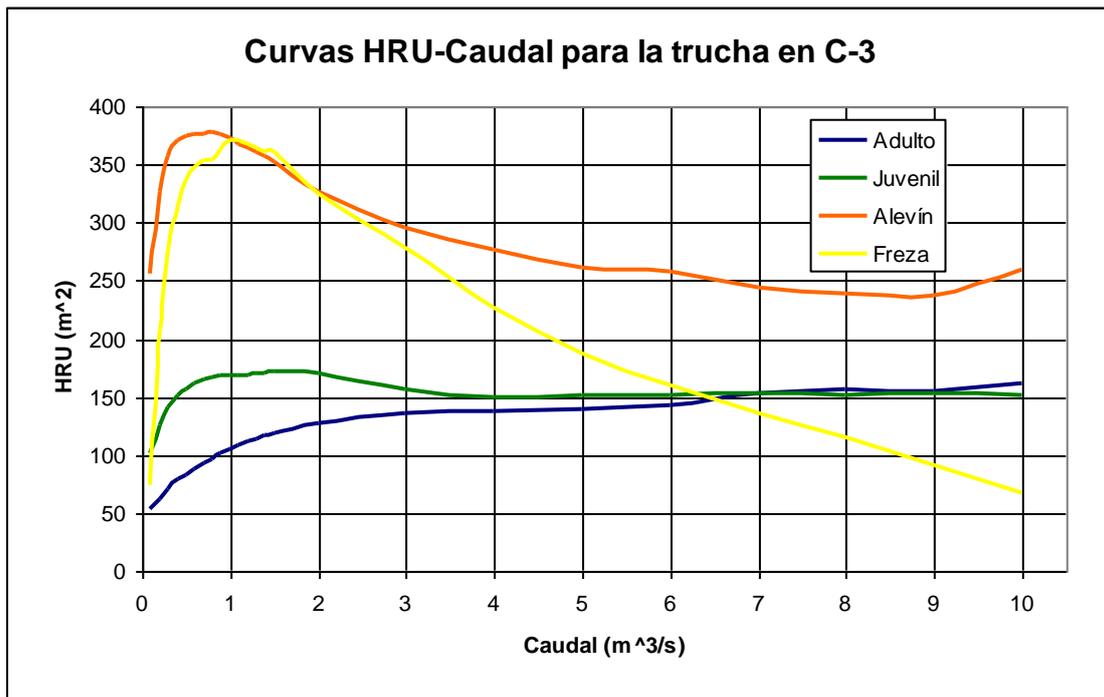


Fig 3.23. Curvas de fluctuación del hábitat real útil en función del caudal circulante, para los cuatro estados de desarrollo de la trucha, en C-3.

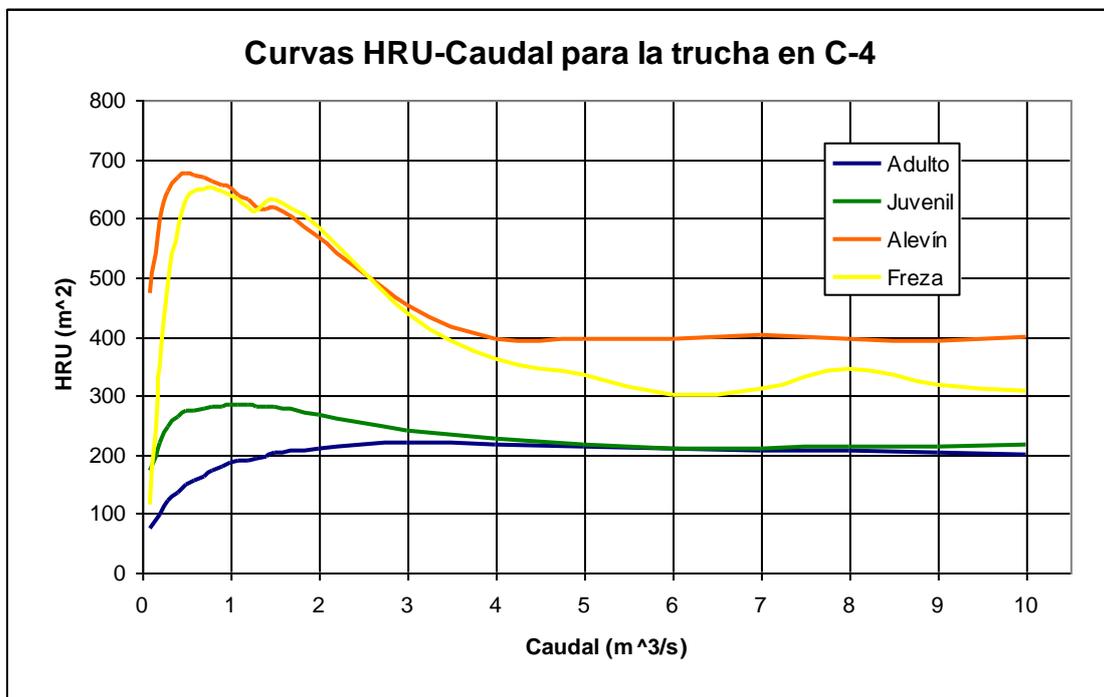


Fig 3.24. Curvas de fluctuación del hábitat real útil en función del caudal circulante, para los cuatro estados de desarrollo de la trucha, en C-4.

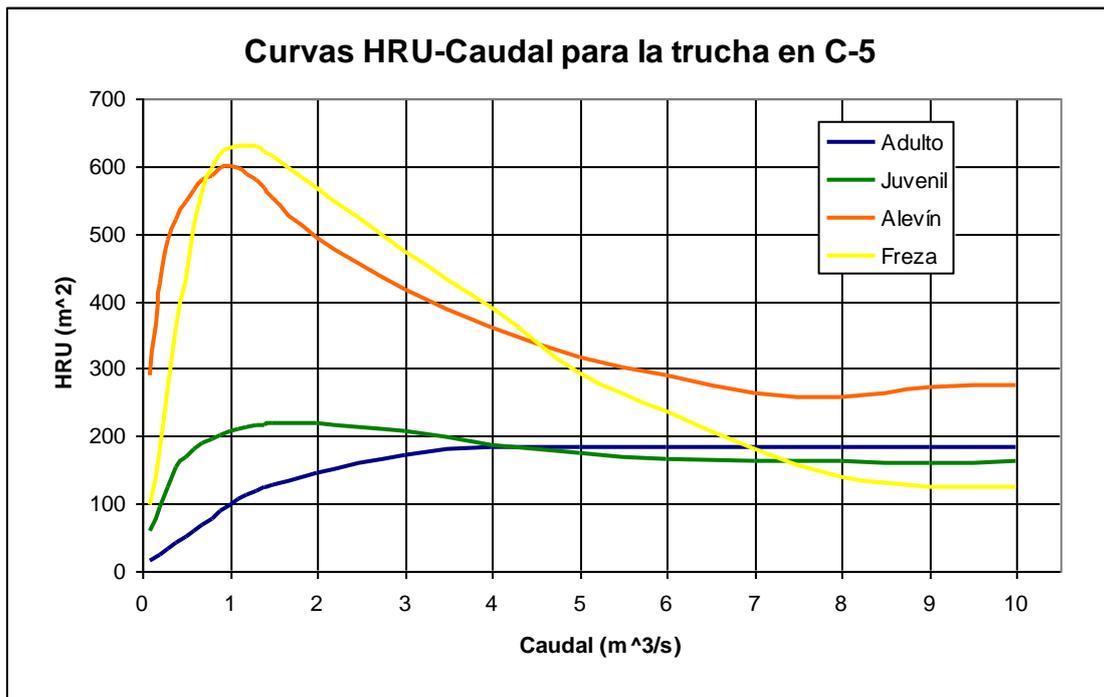


Fig 3.25. Curvas de fluctuación del hábitat real útil en función del caudal circulante, para los cuatro estados de desarrollo de la trucha, en C-5.

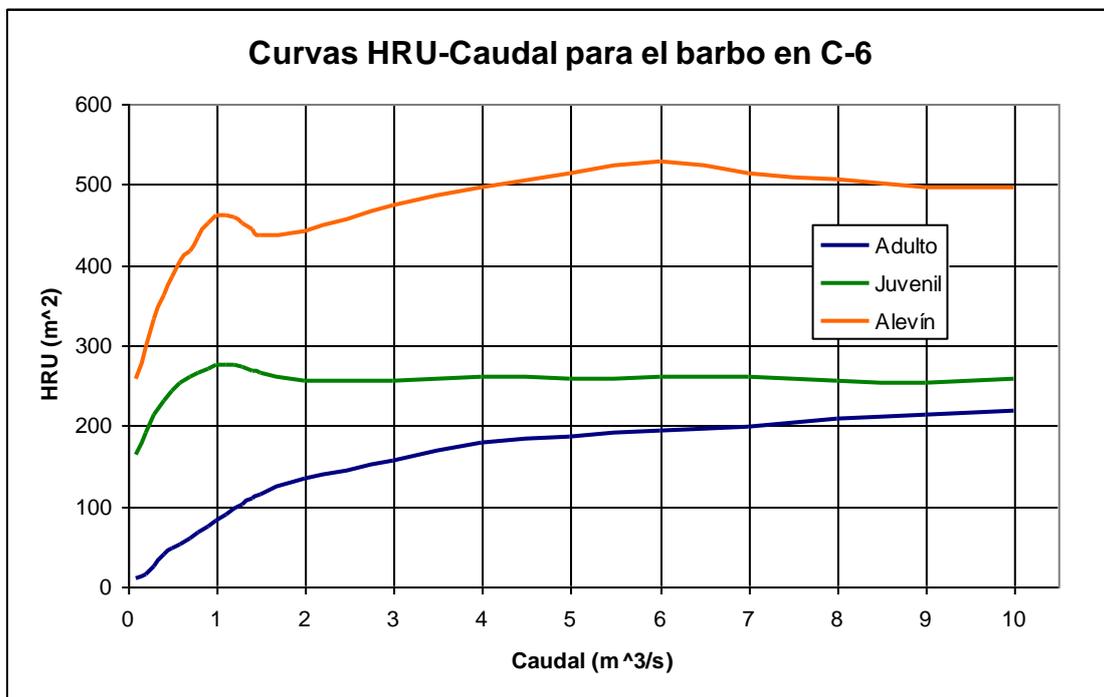


Fig 3.26. Curvas de fluctuación del hábitat real útil en función del caudal circulante, para los tres estados de desarrollo del barbo, en C-6.

En las curvas anteriores se puede ver cómo, por debajo de $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$, el estado de desarrollo que tiene menos hábitat disponible es el adulto en todas las estaciones. Es obvio que las decisiones que se tomen en cuanto al caudal mínimo necesario para mantener el hábitat piscícola, estarán en un rango de valores siempre inferior a $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Por lo tanto, estudiaremos solamente la curva HRU-Caudal correspondiente al adulto, ya que se trata del estado vital más limitante, es decir, al que más afectaría una reducción del caudal circulante.

En las figuras 3.27 a 3.31 se expone, para cada estación de muestreo, la curva HRU-Caudal que corresponde al adulto, junto con su derivada, ya que ésta nos permite apreciar con más claridad los cambios en la pendiente de aquélla. Como consecuencia del análisis de estas curvas podemos señalar algunos caudales base sobre los cuales asignar los mínimos flujos compatibles con la vida del río. En las tablas 3.2 a 3.6 exponemos estos caudales básicos para cada estación de muestreo.

Tabla 3.2. Valores de los caudales básicos (cambios de pendiente), correspondientes a las necesidades de hábitat de los adultos de trucha, en la estación C-1.

C-1	Caudal (m^3/s)	HRU (m^2)
$Q_{b \text{ inf}}$	0,6	201,2
Q_c	1	230,7
$Q_{b \text{ sup}}$	1,3	247,9

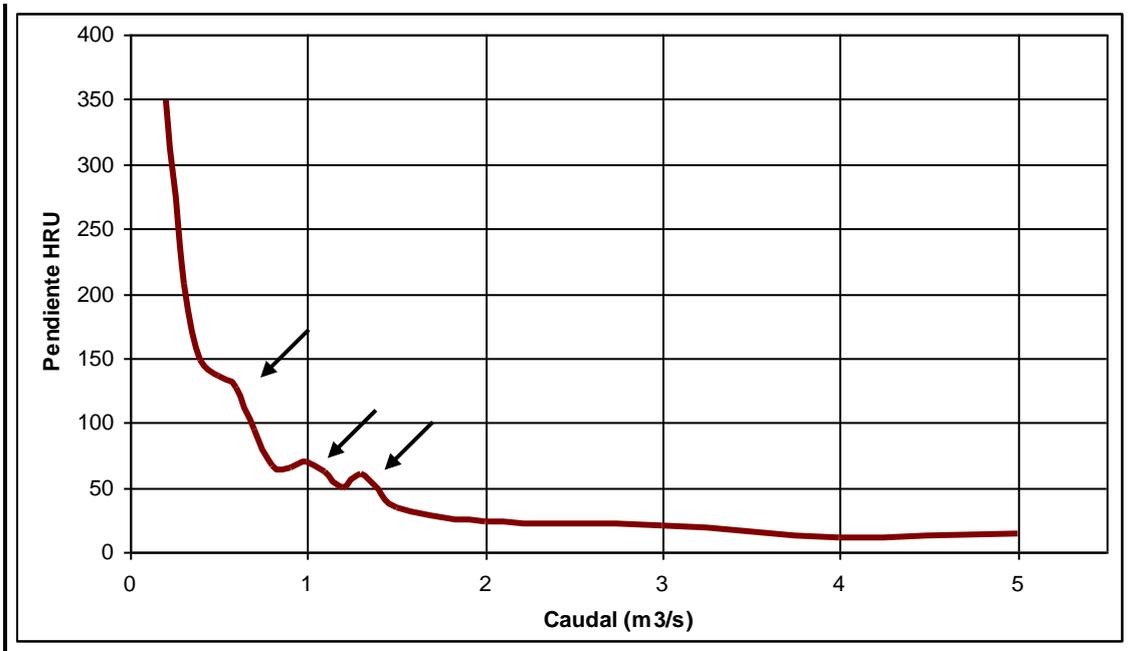
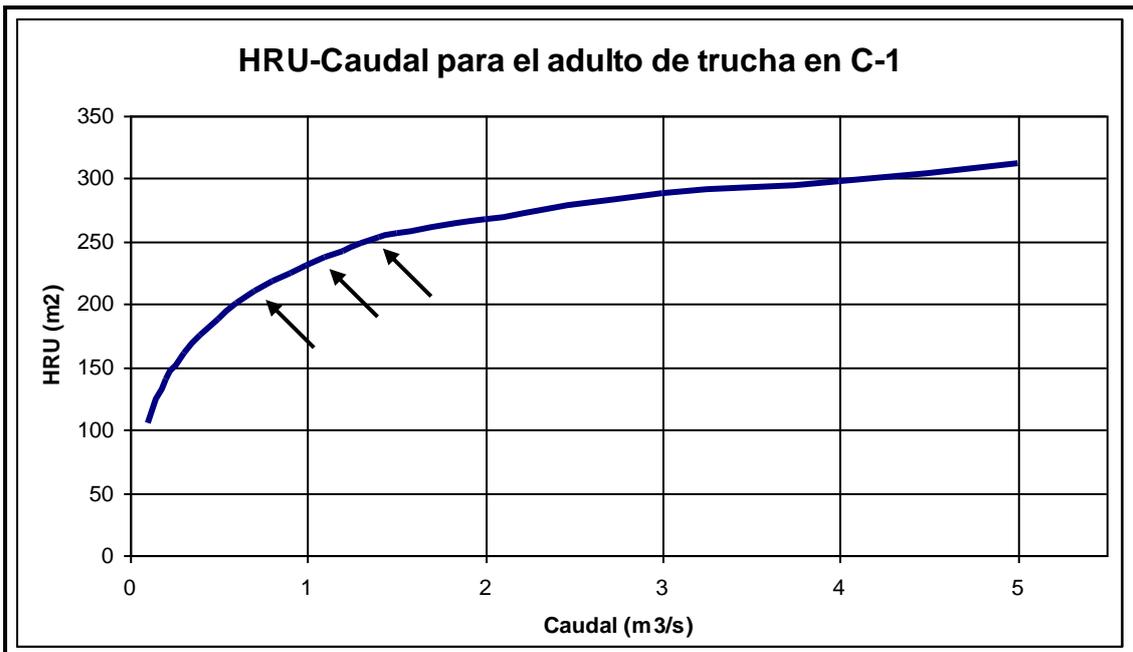


Fig 3.27. Curva de fluctuación del hábitat real útil del adulto de trucha respecto del caudal circulante, junto con su derivada (pendiente), para C-1.

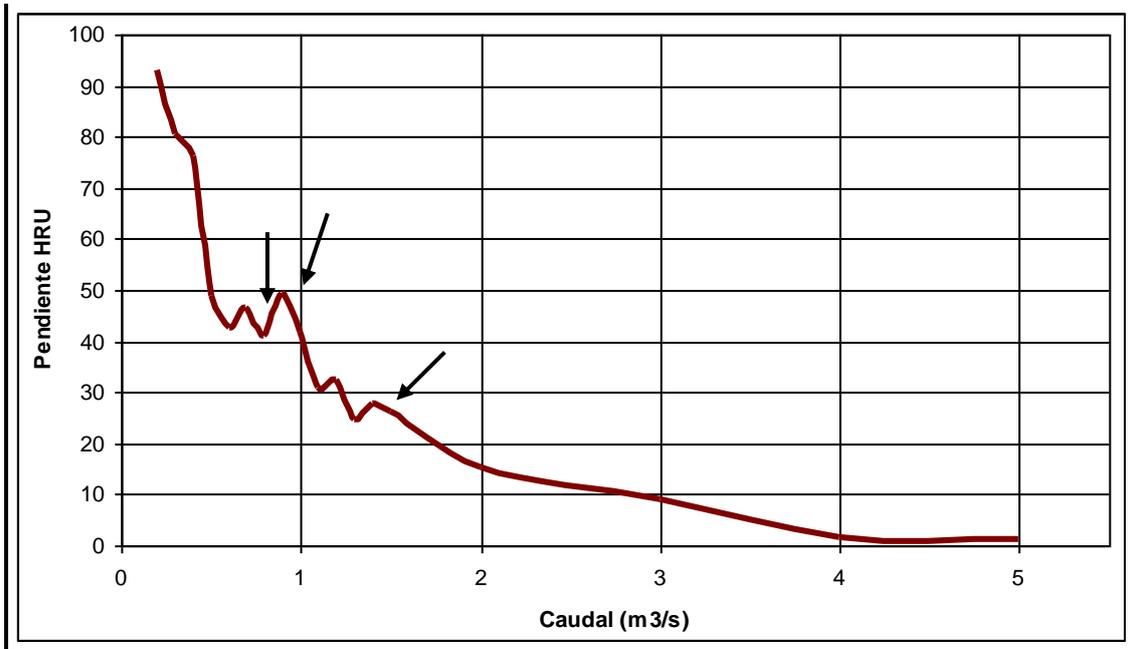
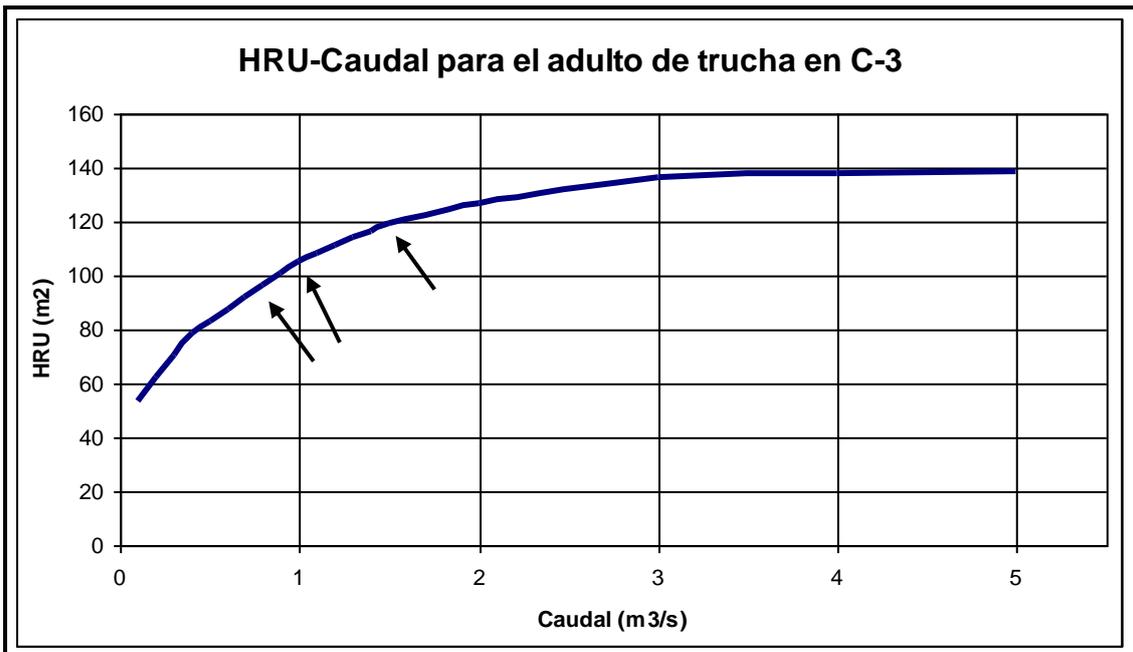


Fig 3.28. Curva de fluctuación del hábitat real útil del adulto de trucha respecto del caudal circulante, junto con su derivada (pendiente), para C-3.

Tabla 3.3. Valores de los caudales básicos (cambios de pendiente), correspondientes a las necesidades de hábitat de los adultos de trucha, en la estación C-3.

C-3	Caudal (m ³ /s)	HRU (m ²)
Q_{b inf}	0,7	91,9
Q_c	0,9	101
Q_{b sup}	1,4	116,6

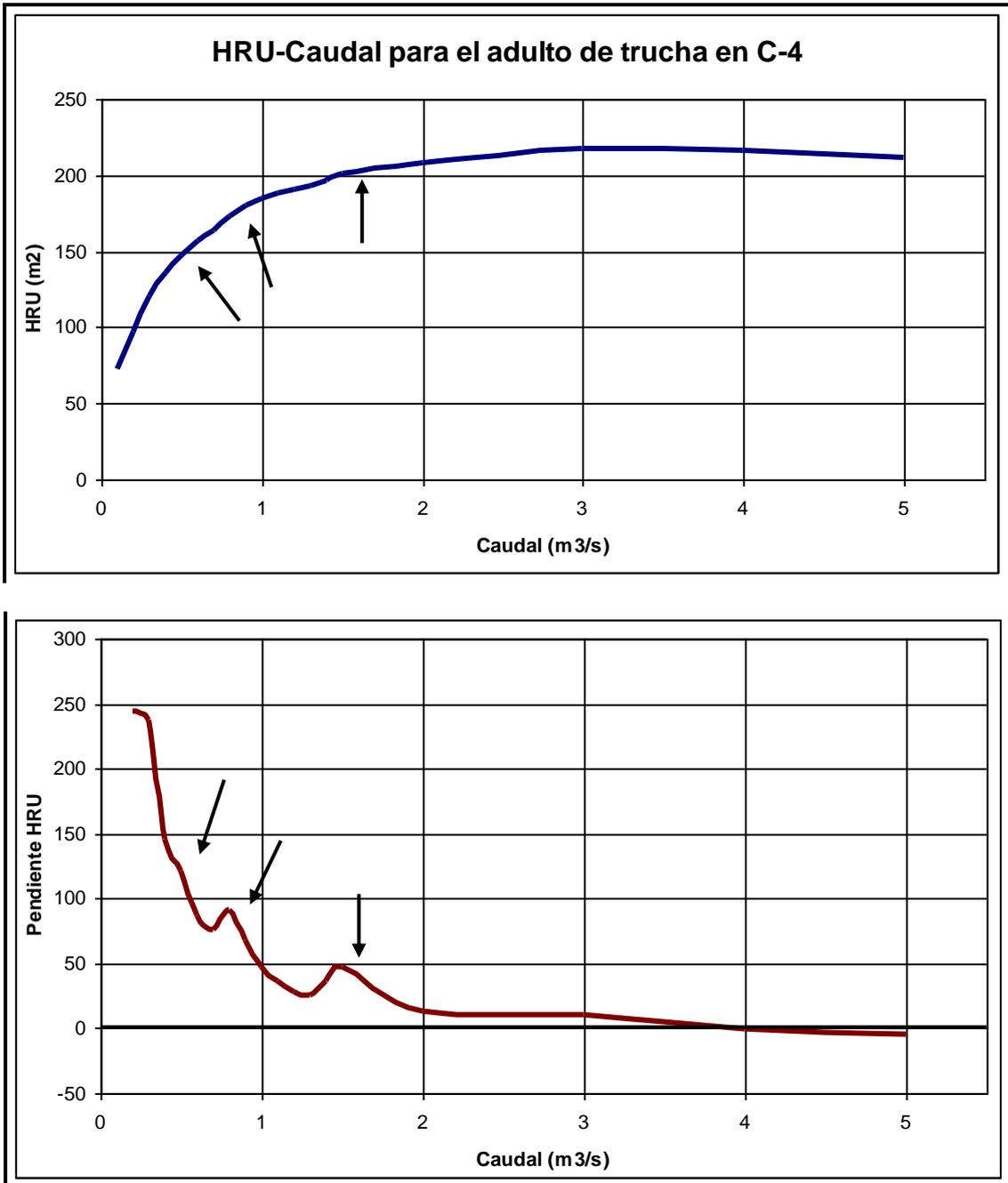


Fig 3.29. Curva de fluctuación del hábitat real útil del adulto de trucha respecto del caudal circulante, junto con su derivada (pendiente), para C-4.

Tabla 3.4. Valores de los caudales básicos (cambios de pendiente), correspondientes a las necesidades de hábitat de los adultos de trucha, en la estación C-4.

C-4	Caudal (m ³ /s)	HRU (m ²)
Q _{b inf}	0,5	147,4
Q _c	0,8	172,7
Q _{b sup}	1,5	201,3

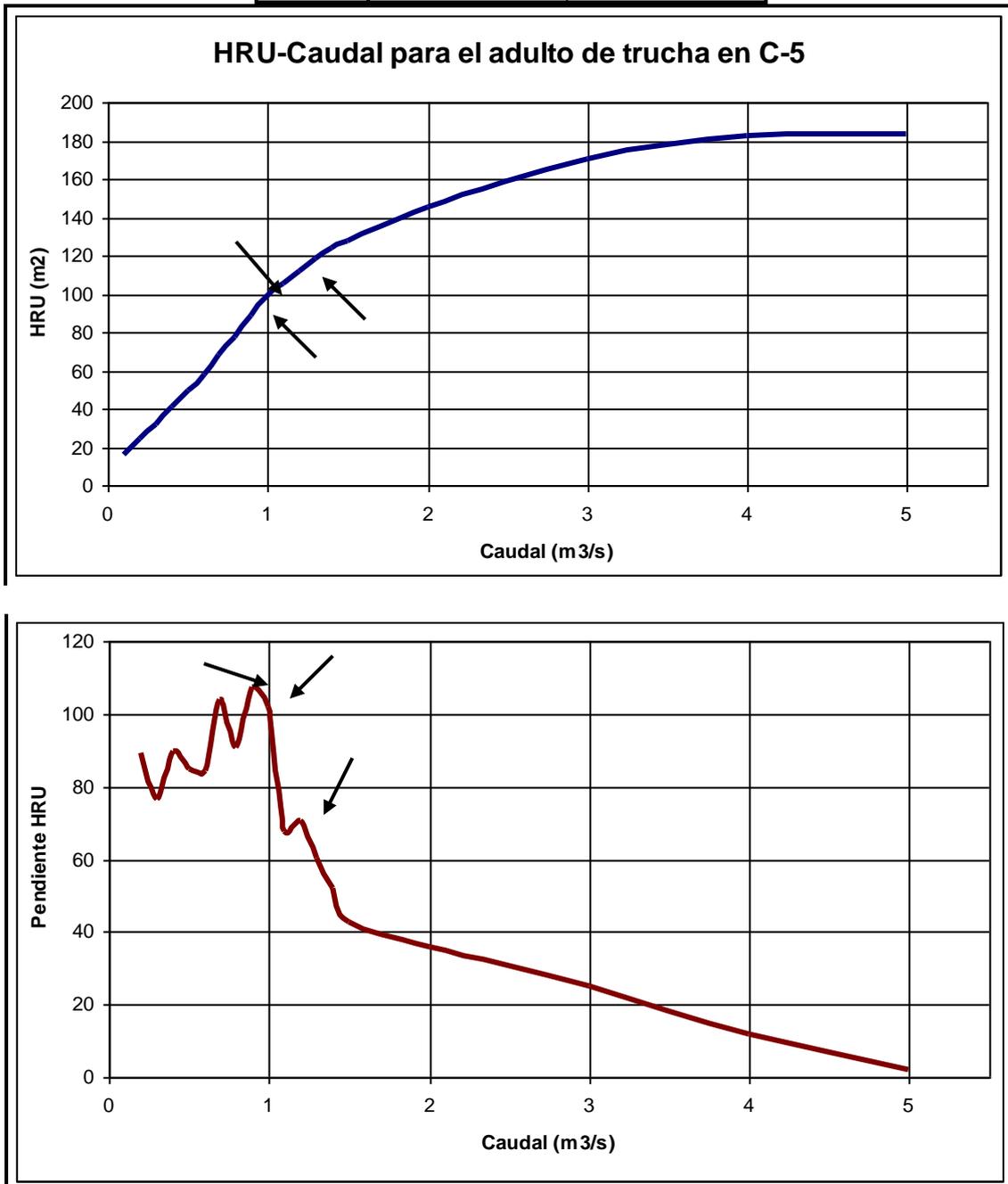


Fig 3.30. Curva de fluctuación del hábitat real útil del adulto de trucha respecto del caudal circulante, junto con su derivada (pendiente), para C-5.

Tabla 3.5. Valores de los caudales básicos (cambios de pendiente), correspondientes a las necesidades de hábitat de los adultos de trucha, en la estación C-5.

C-5	Caudal (m ³ /s)	HRU (m ²)
Q _{b inf}	0,9	88,1
Q _c	1	98,3
Q _{b sup}	1,2	112,1

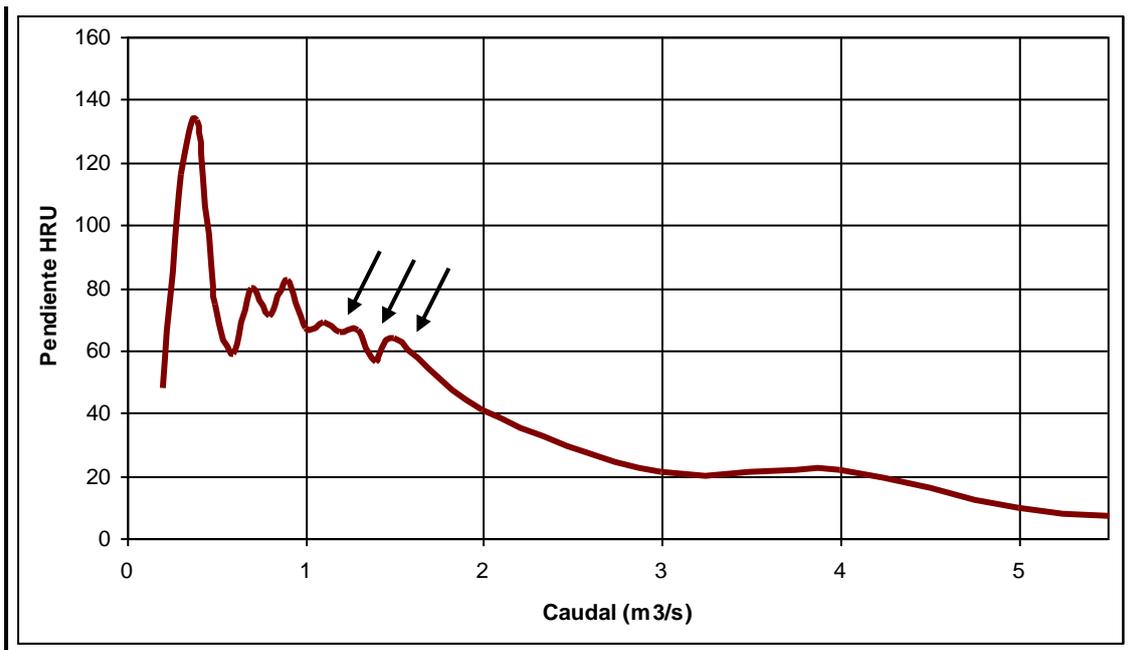
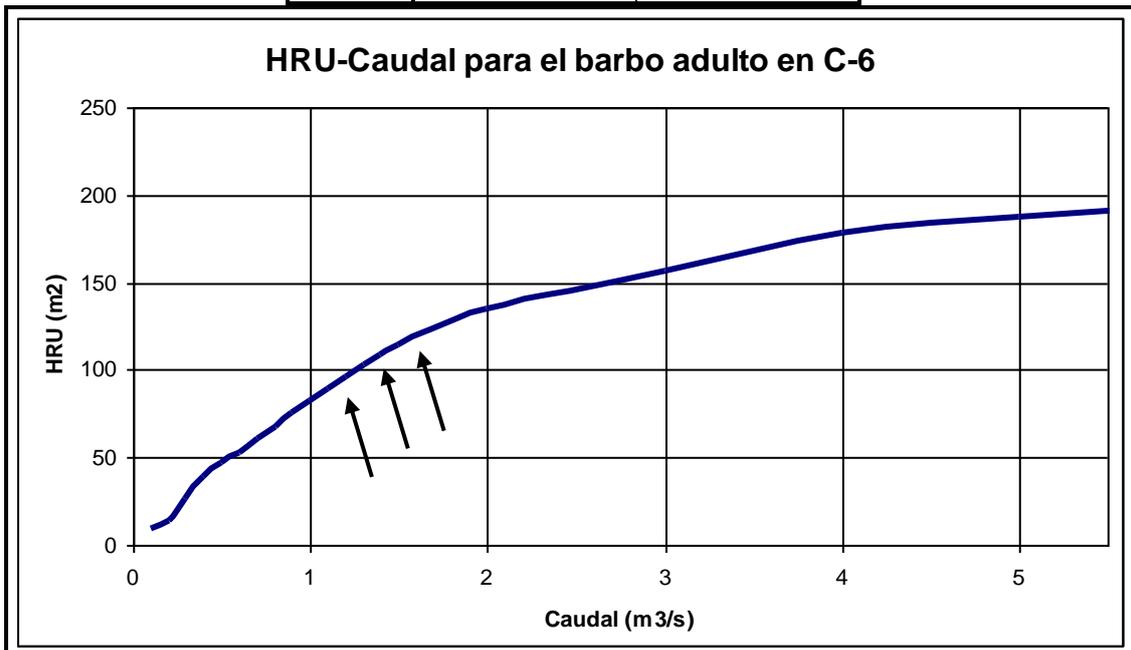


Fig 3.31. Curva de fluctuación del hábitat real útil del adulto del barbo respecto del caudal circulante, junto con su derivada (pendiente), para C-6.

Tabla 3.6. Valores de los caudales básicos (cambios de pendiente), correspondientes a las necesidades de hábitat del adulto del barbo, en la estación C-6.

C-6	Caudal (m ³ /s)	HRU (m ²)
Q _{b inf}	1,1	89,1
Q _c	1,3	102,3
Q _{b sup}	1,5	114,3

3.5. RÉGIMEN NATURAL DE CAUDALES

El régimen natural de caudales nos interesa para utilizarlo como patrón cuyas pautas de fluctuación ha de imitar el régimen ecológico que propongamos. A partir de los datos de aforos de la estación “La Original” (nº 5017) de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, situada donde actualmente se encuentra el final de la cola del embalse, se han evaluado los caudales medios mensuales en régimen natural. En esta estación hay muchos años sin datos, siendo de 8 años el período continuo más largo representado.

En la figura 3.32 se representa el régimen natural en base a estos caudales mensuales. Se trata de un régimen de tipo pluvial, con un solo máximo anual en febrero y un mínimo en verano (agosto).

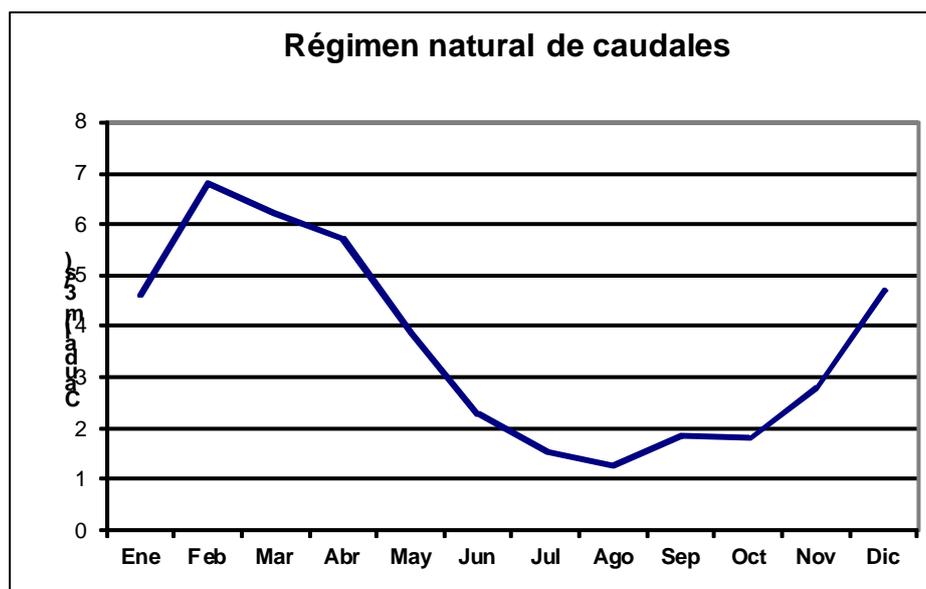


Fig 3.32. Régimen natural de caudales del río Castril, a partir de los datos de la estación de aforos nº 5017 “La Original”, de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

3.6. RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS

Los caudales básicos que se han marcado en el apartado anterior hacen referencia a puntos de las curvas HRU-Caudal en los que hay un cambio en la pendiente, es decir, son puntos a partir de los cuales un aumento de caudal no supone un incremento significativo en la superficie de hábitat disponible.

Sobre estos valores de caudal, se debe escoger el más apropiado teniendo en cuenta diversos criterios: el valor del caudal natural (no tiene sentido proponer un caudal mínimo ecológico que supere al que circula naturalmente); que sigan una pauta lógica en función de la superficie de cuenca drenada, es decir, que el caudal sea mayor en las estaciones de menor altitud.

Atendiendo a estos criterios, se proponen los caudales que se exponen en la tabla 3.7, para cada tramo.

Tabla 3.7. Caudales mínimos propuestos para cada estación de muestreo.

Estación	Caudal (m³/s)
C-1	0,6
C-2	0,65
C-3	0,7
C-4	0,8
C-5	1
C-6	1,3

Como ya se ha dicho, en C-2 no se pudo llevar a cabo la simulación. En esta estación proponemos aplicar un caudal promedio entre los de los tramos inmediatamente superior e inferior (C-1 y C-3).

En la figura 3.33 se puede ver el régimen de caudales ecológicos que proponemos para cada estación de muestreo, junto con el régimen natural. El régimen propuesto para la estación C-6 (Los Laneros), es el único que supera al régimen natural. Esto es debido a que la estación de aforos de donde hemos tomado los datos necesarios para la confección de este

régimen natural, está situada donde actualmente se encuentra la cola del embalse de El Portillo, muy cerca de C-4 (Puente de Lézar). Por lo tanto, al estar C-6 mucho más abajo, tiene una cuenca vertiente mayor y los caudales naturales en este punto son también mucho mayores.

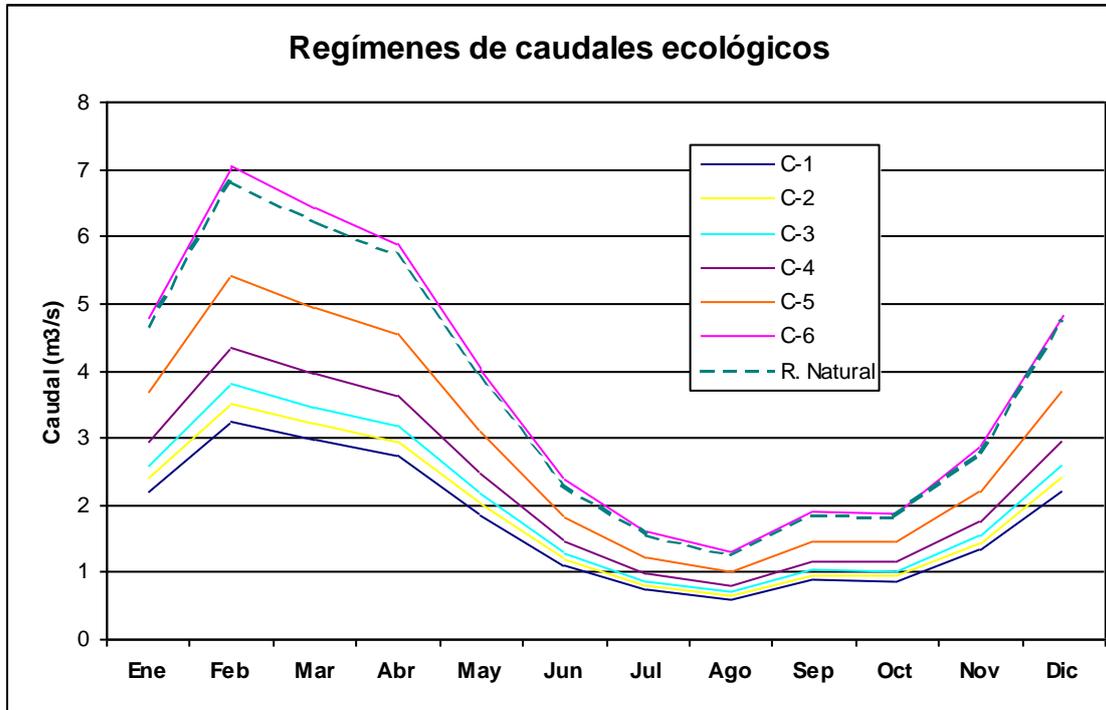


Fig 3.33. Régimen de caudales ecológicos propuesto para las seis estaciones y régimen natural.

III. BIBLIOGRAFÍA

ALLEN, K. R. (1951): Relation between production and biomass. J. Fish. Res. Bord. Can., 28: 1.573-1.581

BAGLINIÈRE, J. L. & MAISSE, G. (1990): La croissance de la truite commune (*Salmo trutta L.*) sur le bassin du Scorff. Bull. Fr. Pêche Piscic., 318: 89-101.

BOVEE, K.D. (1982): A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. Instr. Flow Inf. Paper 12. USDI Fish and Wildl. Serv. Washington. 248 pgs.

CARLE, F. L. & STRUB: A new method for estimating population size from removal data. Biometrics, 34: 621-830.

DOADRIO, Y; ELVIRA, B. & BERNAT, Y. (1991): Peces continentales españoles. Inventario y clasificación de zonas fluviales. Colección Técnica de ICONA, Ed. ICONA. Madrid.

FROST, W. E. & BROWN, M. E. (1971): La Trucha. Ed. Academia S.L. León (España).

GALLEGO BALLESTERO, B., MAYO RUSTARAZO, M. y GARCÍA DE JALÓN, D. (1991): Comparación de la alimentación del cacho (*Leuciscus cephalus pyrenaicus*) con la de la trucha común (*Salmo trutta fario*) y sus relaciones con el macrobentos en el río Sorbe, Guadalajara. Revista de la Asociación para el Estudio y Mejora de los Salmónidos, AEMS, 13 (Informe):2-7.

GARCÍA DE JALÓN, D. y BARCELÓ, E. (1987): Estudio sobre la alimentación de la trucha común en los ríos pirenaicos. Ecología, 1: 263-269.

GARCÍA DE JALÓN, D. y GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, M. (2001): Fijación de caudales ecológicos en los ríos Yaque del Norte y Guanajuma (República Dominicana). INTECSA.

GARCÍA DE JALÓN, D. y GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, M. (2001): Fijación de regímenes ecológicos de caudales en el río Pas (Puente Viesgo). FUCOVASA.

GARCÍA DE JALÓN, D., MAYO, M., HERVELLA, F., BARCELÓ, E. & FERNÁNDEZ, T. (1993): Principios y técnicas de gestión de la pesca en aguas continentales. Ed. Mundiprensa. Madrid.

GARCÍA DE JALÓN, D. y SCHMIDT, G. (1995): Manual práctico para la gestión sostenible de la pesca fluvial. Ed. AEMS.

GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, M. & GARCÍA DE JALÓN, D. (1995): Restauración de ríos y riberas. Ed. Fundación Conde del Valle de Salazar.

HYNES, H.B.N. (1970): The ecology of running waters. Univ. Toronto Press. 555 pp.

LÓPEZ-ÁLVAREZ, J.V. (1984): Observaciones sobre la alimentación natural de la trucha común (*Salmo trutta fario*) en algunos ríos de la cuenca del Duero. *Limnética*, 1: 247-255.

MARGALEF, R., D. PLANAS, J. ARMENGOL, J. TOJA, A. GUISET, A. VIDAL, N. PRAT y M. ESTRADA. 1976. Limnología de los embalses españoles. Ministerio de Obras Públicas. Madrid. 421 págs.

MARTÍNEZ CAPEL, F. (2000): Preferencias de microhábitat de *Barbus bocagei*, *Chondrostoma polylepis* y *Leuciscus pyrenaicus* en la cuenca del río Tajo. Tesis doctoral. Director: García de Jalón, D. (E.T.S.I. Montes) Madrid

PETTS, G. E. 1984. Impounded rivers. Perspectives for ecological management. John Wiley & Sons Ltd. Chichester. 326 págs.

RALEIGH, R. F., ZUCKERMAN, L. D. y NELSON P. C. (1986): Habitat suitability index models and instream flow suitability curves: Brown trout. US Fish Wildl. Serv. Biol. Rep. No 82, Fort Collins. 65 pg

SILVA LÓPEZ, RAFAEL (1997): Plan de Ordenación de los Recursos Naturales y Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Natural Sierra de Castril. Ed. Junta de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente.

STALNAKER, C. B. (1979): The use of habitat structure preferenda for stablishing flow regimens necessary for maintenance of fish habitat. En: The ecology of Regulated Rivers. J. V. Ward y J. Stanford. 326-337. Plenum Press.

WARD, J. V. & STANDFORD 1979. The ecology of regulated streams. Plenum Press. Nueva York.