

Determinación del hábitat potencialmente utilizable por la especie *Salmo trutta* en un tramo del río Lozoya, España

Ezequiel García-Rodríguez

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

Poliopetro F. Martínez-Austria

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Diego M. García de Jalón-Lastra

Universidad Politécnica de Madrid, España

Luis A. Ochoa-Franco

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

*En el presente trabajo se efectúa la estimación del hábitat potencialmente utilizable (HPU) y del caudal que lo maximiza para los estadios de vida adulto, juvenil, alevín y freza de la especie *Salmo trutta* (trucha común), especie muy apreciada en la pesca deportiva y para el consumo humano. Para tal fin, de acuerdo con la Metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology), se efectuó la simulación del hábitat físico fluvial de un tramo de 609 m del río Lozoya (Madrid, España) utilizando un modelo bidimensional de la hidrodinámica, un modelo para la simulación del hábitat y los modelos de preferencia de hábitat de la especie antes mencionada. Los modelos fueron alimentados con información hidráulica, geomorfológica, biológica y de características específicas del hábitat obtenidas en campo. Los valores del hábitat potencialmente utilizable (HPU) obtenidos para los cuatro estadios de desarrollo de la especie *Salmo trutta* permitieron determinar que el caudal de $1.97 \text{ m}^3/\text{s}$ maximiza el HPU para sus estadios de vida adulto, juvenil y freza, y que el caudal de $1.08 \text{ m}^3/\text{s}$ maximiza el hábitat potencialmente utilizable para su estadio de desarrollo alevín. Las curvas caudal-hábitat potencialmente utilizable obtenidas en el presente trabajo constituyen información valiosa para los usuarios y los gestores de los recursos fluviales del río Lozoya, con miras a establecer un régimen de caudales ecológicos que permita conservar el ecosistema correspondiente y, en caso necesario, evaluar los impactos relacionados con posibles modificaciones del régimen de caudales.*

Palabras clave: curva caudal-hábitat potencialmente utilizable, *Salmo trutta*, río Lozoya, simulación del hábitat, simulación bidimensional de la hidrodinámica fluvial, IFIM, modelos de preferencia de hábitat, conservación del ecosistema fluvial.

Introducción

Los ríos han jugado un importante papel en el desarrollo de la población humana, ya que han constituido un

medio para el abastecimiento de agua y alimento, así como una forma de transporte y fuente para la generación de energía.

Con la finalidad de aprovechar los recursos fluviales, se llevan a cabo una serie de obras de ingeniería, como presas, encauzamientos, puentes, alcantarillas y derivaciones, así como descargas de agua que modifican el régimen de caudales, provocan alteraciones en el hábitat en el que se desarrollan las especies acuáticas y pueden representar obstáculos para su migración. Para reducir los efectos de la modificación del régimen natural de caudales se establecen regímenes de caudales ecológicos o ambientales.

Las metodologías que más se han utilizado en el ámbito mundial (Tharme, 2003; Reiser *et al.*, 1989) para determinar regímenes de caudales ecológicos son la de Tennant (Tennant, 1976), basada en datos hidrológicos (caudales históricos), y la IFIM (Instream Flow Incremental Methodology).

La metodología IFIM se desarrolló con el liderazgo del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos de América (US Fish and Wildlife Service-USFWS), por un equipo multidisciplinario de científicos pertenecientes a la academia y a agencias federales y estatales de los Estados Unidos (Stalnaker *et al.*, 1995), y su primera descripción completa apareció en 1982, en el Instream Flow Information Paper 12, denominado *A Guide to Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology*, publicado por el USFWS (Bovee, 1982). IFIM integra numerosas técnicas desarrolladas en los ámbitos de las ingenierías de los recursos hidráulicos y de la calidad del agua, de la biología de peces y de las ciencias sociales (Stalnaker 1982, en Stalnaker *et al.*, 1995).

La metodología IFIM se debe considerar, principalmente, como *un proceso* para resolver problemas relacionados con la distribución del agua (Bovee *et al.*, 1998), los cuales incluyen afectaciones a los recursos relacionados con el hábitat fluvial (como las que se presentan cuando se modifica el régimen de caudales); por tanto, es un sistema diseñado para apoyar las decisiones de los gestores de los recursos naturales (por ejemplo, las políticas de operación de un embalse y la correspondiente inclusión del uso para la conservación de los ecosistemas asociados), ya que se determinan los beneficios o consecuencias de diferentes alternativas de manejo del agua. Para tal efecto, la metodología IFIM intenta integrar los conceptos de planificación de los abastecimientos de agua, modelos analíticos de las ingenierías hidráulica y ambiental, así como funciones obtenidas empíricamente, que correlacionan el hábitat con el caudal que fluye por los cauces, de tal manera que se obtienen simulaciones de la cantidad y calidad del hábitat potencial que puede ser utilizado por la(s) especie(s) objetivo (las especies

a proteger), en función de una gama de gastos, lo que permite evaluar escenarios para diferentes regímenes de caudales que se podrían obtener después de la manipulación del régimen original de caudales.

La metodología IFIM se pone en práctica en cinco fases secuenciales (Bovee *et al.*, 1998):

I. *La identificación de problema.* En esta fase se efectúa un análisis legal-institucional del problema, y la determinación de las características de la zona afectada por las modificaciones que se propongan.

II. *La planificación de estudio.* En la que se incluyen las escalas espacial y temporal para las evaluaciones, las variables importantes cuya información se requiera, y la forma en la que se obtendrá esta información en caso de que no exista.

III. *La puesta en práctica (implementación) del estudio.* Que consiste en varias actividades: obtención de la información, calibración de modelos, simulaciones con fines de predicción y síntesis de resultados. En esta fase se utiliza un sistema para la simulación del hábitat (como el *PHABSIM*, Physical Habitat Simulation System, Waddle, 2001), a fin de estimar el valor del hábitat.

IV. *El análisis de alternativas y la solución del problema.* En el cual se tiene en cuenta, en primera instancia, la efectividad de la alternativa, la viabilidad física, y los impactos sociales y económicos.

En la metodología IFIM, la simulación del hábitat fluvial es una herramienta fundamental (Bovee, 1982; Bovee *et al.*, 1998).

La simulación del hábitat pretende integrar dos de las principales componentes del ecosistema fluvial que determinan la productividad de la fauna acuática: el régimen de flujo y la estructura física del hábitat (Karr *et al.*, 1986). Para integrar dichos componentes se emplean modelos para la simulación de la hidrodinámica fluvial y del hábitat, que son alimentados con datos hidrométricos, biológicos y geomorfológicos tomados directamente del río en estudio, de tal manera que para cada caudal se determina la disponibilidad de hábitat potencialmente utilizable por los organismos acuáticos objetivo, y se construyen gráficos caudal-HPU para determinar el caudal que maximiza el hábitat potencialmente utilizable. Este caudal constituye una referencia básica para determinar el régimen de caudales ecológicos o ambientales.

Los sistemas de simulación del hábitat están constituidos, fundamentalmente, por dos partes: 1)

uno o varios modelos para efectuar la simulación de la hidrodinámica fluvial, y 2) uno o varios modelos para efectuar la simulación del hábitat.

Con anterioridad al presente trabajo se han aplicado modelos bidimensionales para la simulación hidrodinámica con fines de evaluación del hábitat (Tarbet y Hardy, 1996; Lafleury Leclerc, 1997; Waddle *et al.*, 2000; USFWS, 2003); sin embargo, cabe mencionar que en el caso tratado en el presente escrito se ha efectuado una detallada calibración del modelo, utilizando la cantidad de información hidrométrica obtenida en campo necesaria para tal fin, y en la mayoría de los casos la calibración se ha hecho con una cantidad de datos mínima.

En la ilustración 1 se presenta un diagrama simplificado del proceso de aplicación de un sistema de simulación del hábitat fluvial en el marco de la metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology).

Tomando como base lo antes mencionado, se presenta la simulación del hábitat de un tramo de 609 m del río Lozoya (García, 2004), en el que se determina el hábitat potencialmente utilizable (HPU) y el caudal que lo maximiza para la especie *Salmo trutta* (trucha común) en sus estadios de vida adulto, juvenil, alevín

y freza, utilizando un modelo bidimensional de la hidrodinámica fluvial y siguiendo los procedimientos contenidos en la metodología IFIM (Bovee, 1982; Bovee *et al.*, 1998).

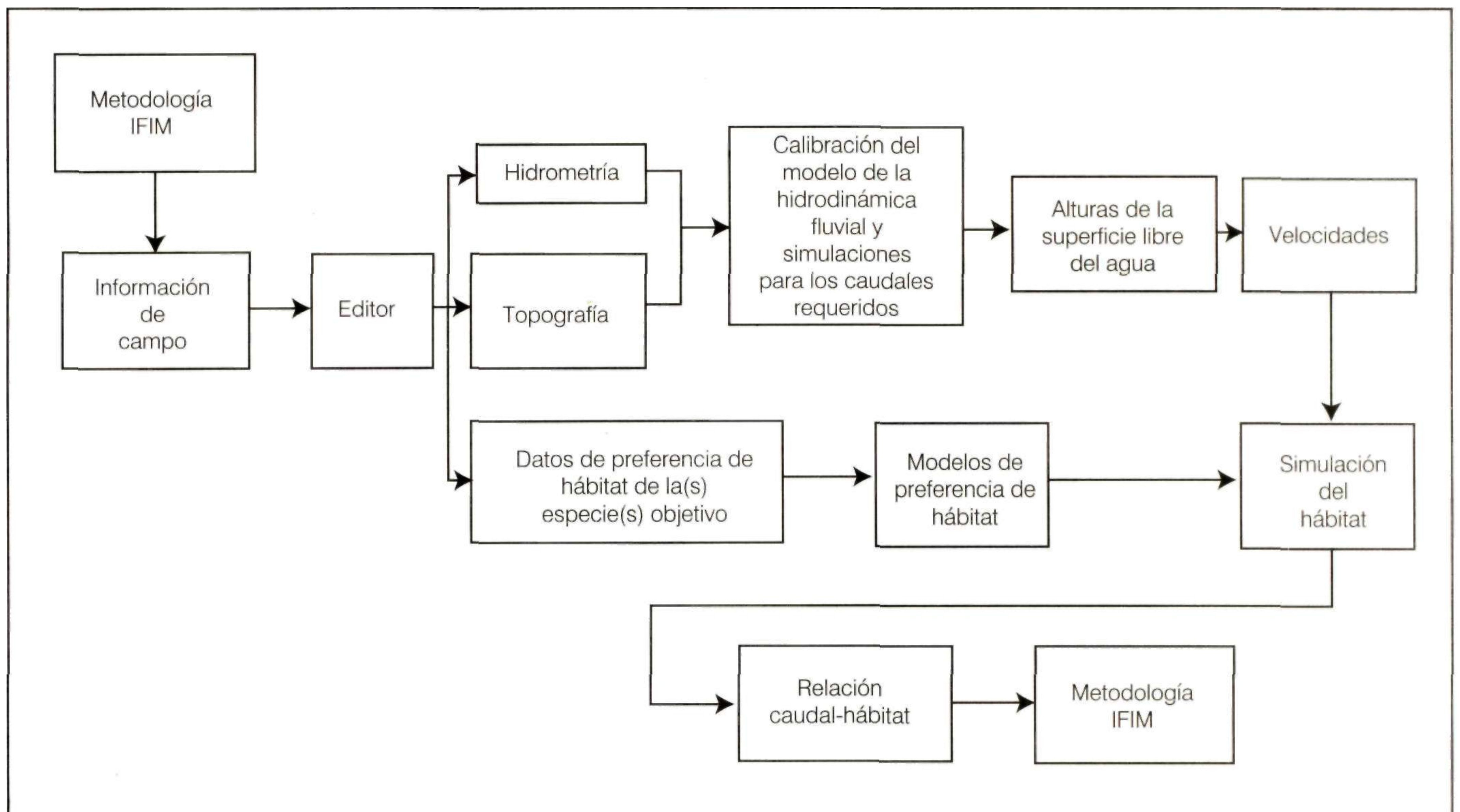
Metodos

Zona de estudio

La importancia del río Lozoya, desde el punto de vista ecológico y paisajístico, así como social, incluida su aportación de agua de buena calidad para el abastecimiento de la ciudad de Madrid, España, son algunas características por las que se le eligió para el presente trabajo.

- Localización geográfica. La cuenca del río Lozoya está ubicada en la zona norte de la Comunidad Autónoma de Madrid, situada sensiblemente en el centro del territorio español (ilustración 2), en la vertiente suroeste de la Cordillera Central. El río Lozoya nace en la Laguna Grande de Pehalara (Fernández, 1915), a 2 000 metros de altura, entre las sierras de Guadarrama, por el norte, y la de la Cuerda Larga, por el sur.

Ilustración 1. Diagrama simplificado del proceso de aplicación de un sistema de simulación del hábitat fluvial en el marco de la metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology).



- Climatología. El clima del Valle del Lozoya se puede clasificar como de tipo mediterráneo subhúmedo-húmedo de inviernos fríos, si bien en las mayores altitudes de la divisoria se encuentra un clima mediterráneo de alta montaña. La temperatura media anual en la zona en la que se ubica el tramo del estudio es de 10.3 °C, la precipitación media anual de 796 mm y la cota de 1 095 msnm, observándose a lo largo de la cuenca un marcado gradiente altitudinal en la precipitación y temperatura.

- Hidrología. El río Lozoya es afluente del río Jarama y ambos forman parte de la cuenca hidrográfica del río Tago. El Lozoya es embalsado por la presa de Pinilla después de discurrir aproximadamente 20 km con dirección noreste, para luego completar su recorrido de 91 km en total, donde confluye con el río Jarama en el embalse de Valdeatales. Dicho río es embalsado en otros cinco puntos de su recorrido, además de los mencionados antes, y el área total de su cuenca es de 983.3 km².

El río Lozoya queda encuadrado dentro del grupo de los ríos de montaña media de acuerdo con la clasificación de Masachs (1948) de los ríos ibéricos, en los que las precipitaciones pluviales tienen mayor protagonismo que las nivales. Sin embargo, en la zona alta de la cuenca del Lozoya, la escorrentía, producto del deshielo, puede ser tan importante como la de origen pluvial.

- Ictiofauna. De acuerdo con García de Jalón *et al.* (2002), en la zona alta de la cuenca del río Lozoya se

pueden encontrar trece especies de peces de cuatro familias diferentes, de las cuales, para el presente trabajo, se seleccionó la especie *Salmo trutta* (trucha común), perteneciente a la familia *Salmonidae*, especie muy apreciada en la práctica de la pesca deportiva y para el consumo humano.

- Tramo de estudio. El tramo de estudio está ubicado en una zona de orden III sobre el río Lozoya, dentro del coto de pesca de Alameda del Valle. Su extremo inferior se encuentra a 800 m del puente de Pinilla del Valle, el cual está ubicado sobre la "cola" del embalse del mismo nombre. Sus coordenadas UTM, en la zona inferior, son 30T0430655 UTM4530001 (obtenidas con un GPS marca GARMIN® modelo XL, que puede captar 12 satélites), y su altitud es de 1 095 msnm. El embalse de Pinilla no presentó efecto alguno sobre el tramo del estudio durante el desarrollo de los trabajos.

La ilustración 3 muestra un esquema del tramo del estudio, el cual tiene 609 m de longitud, y cuenta con dos islas, una ubicada a partir de treinta metros de la sección transversal en el extremo inferior, y la otra a cuatrocientos metros de la misma.

El ancho promedio del tramo, en el cauce principal, es de 15 m, y de 6.5 m en los cauces secundarios, situados en el lado izquierdo de la isla superior y en el lado derecho de la isla inferior en relación con la dirección del flujo. La pendiente media del tramo, en el nivel del thalweg, es de 0.0041, y el caudal medio anual es de 3.1 m³/s a la altura del sitio de estudio, con caudales máximos de 45 m³/s.

En cuanto al hábitat, se cuenta con pozas que pueden ser utilizadas por la ictiofauna como refugio, para atrapar presas, anidar y descansar, así como zonas de aguas rápidas (e.g. rabiones), con sustrato de gravas que pueden constituir frezaderos. También se observan ramas y raíces sumergidas, cornisas, troncos, rocas y fisuras en la roca madre que pueden servir de refugio. El sustrato predominante está formado por gravas y cantos, destacando la presencia de roca madre fisurada en la zona central del tramo, así como depósitos de arena en las orillas del cauce y, sobre todo, en las zonas de pozas.

Simulación de la hidrodinámica fluvial

Para efectuar la simulación de la hidrodinámica y del hábitat se empleó un modelo bidimensional promediado en la profundidad, el cual permite predecir zonas de flujo supercrítico y las transiciones asociadas, e incorpora un modelo de flujo subterráneo

Ilustración 2. Localización del tramo de estudio en la Comunidad Autónoma de Madrid y en la península Ibérica.

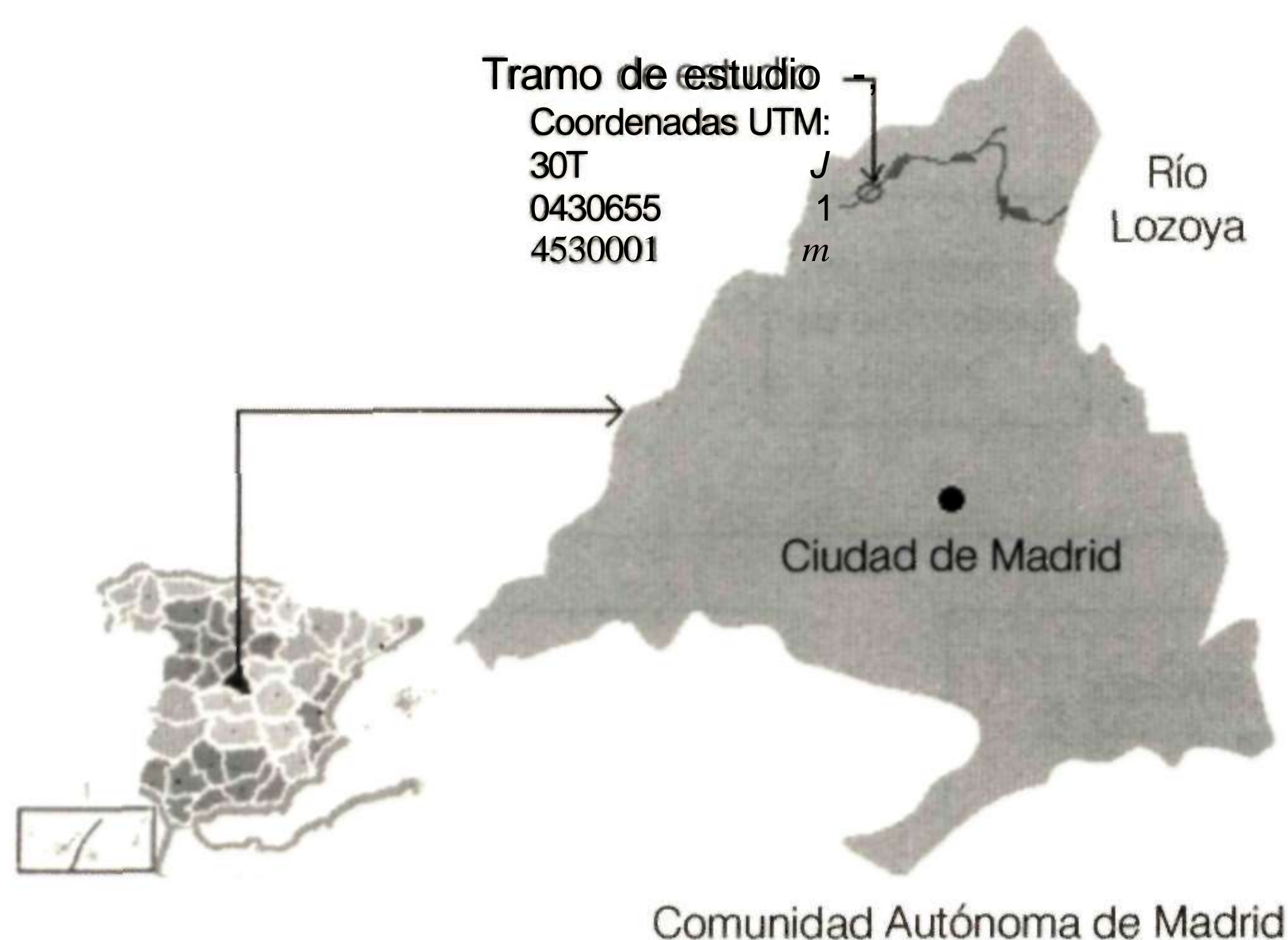
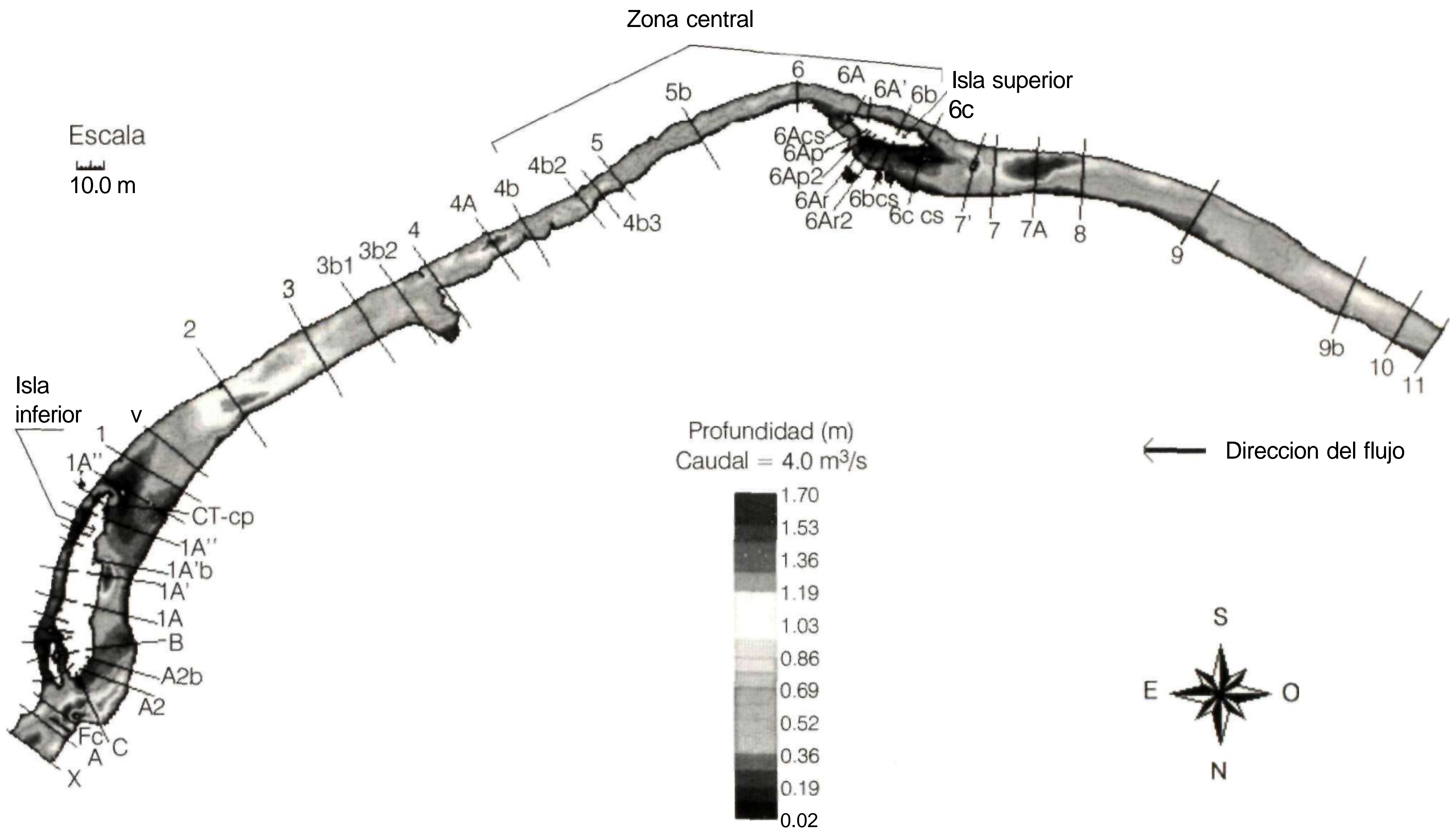


Ilustración 3. Esquema del tramo de estudio.



que se utiliza como una manera conveniente de resolver el proceso inundado/seco de las fronteras de la superficie del agua. Para discretizar el problema y encontrar su correspondiente solución, se emplea el método del elemento finito, utilizando una malla formada por elementos triangulares irregulares (Steffler y Blackburn, 2002).

Las ecuaciones que describen el flujo bidimensional del modelo utilizado se obtienen aplicando los principios de la conservación de la masa y el *momentum* a una columna vertical prismática de agua, delimitada en la base por el cauce y en la parte superior por la superficie libre del agua (Van Rijn, 1990, en Ghanem *et al.*, 1995).

Para efectuar la simulación del hábitat ictiológico se utilizó el procedimiento de cálculo establecido en el sistema de simulación del hábitat físico PHABSIM, que forma parte de la metodología IFIM, haciendo previamente las adaptaciones para poder efectuar los cálculos utilizando una malla de elementos finitos en lugar de celdas definidas en la vertical por dovelas que forman parte de secciones transversales.

Obtención de datos de campo

- Datos necesarios

Como datos iniciales se requieren: (1) la topografía del cauce, cuya obtención precisa es el paso más decisivo y tardado; (2) la rugosidad, como altura de rugosidad a utilizar en la fórmula de Chezy; (3) las condiciones de contorno, que consisten en introducir el caudal de la sección transversal de entrada (*i.e.* la del extremo situado aguas arriba) y la altura de la superficie del agua a la salida del tramo del estudio y, (4) la malla de discretización, cuya finalidad es representar las características topográficas del cauce como una serie de elementos en los que se determinan las características del campo de flujo.

No obstante lo mencionado en cuanto a información necesaria, con la finalidad de efectuar una calibración mejor del modelo hidrodinámico, en el presente trabajo se utilizaron alturas de la superficie libre del agua (ASLA's) obtenidas para cuatro caudales diferentes y perfiles de velocidades determinados para tres

caudales diferentes (cuadro 1), en sesenta secciones transversales distribuidas en el tramo de 609 m de longitud empleado en el estudio (ilustración 3). Las campañas de obtención de datos hidrométricos se realizaron en el periodo de un año, lo que permitió obtenerlos para diferentes caudales (caudales bajo, medio y alto), y la mayor parte del trabajo topográfico se obtuvo a la par con la primera campaña de obtención de datos hidrométricos, en un periodo de veinte días.

- Topografía

Para representar la morfología del cauce de acuerdo con el método de discretización utilizado en el modelo bidimensional de la hidrodinámica, y generar adecuadamente los datos que se utilizaron para tal fin, se obtuvieron las *líneas características* o principales del cauce (orillas, pie del talud, bankfulls, etcétera), complementadas con un recorrido en la zona de circulación de los caudales de interés, así como todos aquellos puntos que permitieran captar las variaciones significativas tanto topográficas como de hábitat. Se delinearon, también, las islas superior e inferior, y otros elementos importantes (como troncos y piedras).

Debido a la relación directa entre la calidad de la definición de la morfología fluvial y los resultados del modelo de la hidrodinámica fluvial con enfoque bidimensional utilizado en el presente trabajo, se levantaron en campo 7 584 puntos en total, con un espaciamiento medio de un punto por cada 1.5 m². Para obtener una mejor definición se utilizó una mayor densidad de puntos en las zonas de flujo más complejo, como es el caso de la correspondiente a las islas.

Cuadro 1. Caudales de muestreo.

Caudales de muestreo (m ³ /s)	Datos hidrométricos obtenidos
4.00	Velocidades, profundidades y cotas del agua en el cauce principal y los cauces secundarios.
1.45	Velocidades, profundidades y cotas del agua en el cauce principal y los cauces secundarios.
0.65	Velocidades, profundidades y cotas del agua en el cauce principal y los cauces secundarios.
0.20	Velocidades, profundidades y cotas del agua en el cauce principal y los cauces secundarios.
3.04	Cotas del agua en los cauces secundarios
1.97	Cotas del agua en los cauces secundarios

Para obtener la batimetría del cauce respecto a un mismo punto de referencia (*i.e.* banco de nivel), se utilizó una poligonal abierta situada a lo largo del tramo del estudio y se obtuvieron las coordenadas x, y, z de cada punto de interés, utilizando una estación total PENTAX® PCS-315.

- Obtención de datos hidráulicos (velocidades, profundidades y caudales)

Además de los datos mínimos necesarios para calibrar el modelo, se utilizaron datos de tres aforos realizados en cada una de las sesenta secciones transversales antes mencionadas, con la finalidad de determinar el caudal y la distribución de velocidades en cada una de ellas. En el espaciado de los puntos de medición de las velocidades y profundidades del agua [*i.e.* tirantes], se tuvieron en cuenta los requerimientos mínimos para efectuar correctamente el aforo correspondiente, de acuerdo con Herschy (1999), y se utilizó en las mediciones un correntómetro electromagnético marca Valeport®, modelo 801, con prestaciones para medir velocidades en un rango de ± 5 m/s, en 5 cm de tirante de agua como mínimo, con precisión de $\pm 5\%$ de la lectura, provisto de una unidad de despliegue y almacenamiento de datos, que tiene la posibilidad de promediar varias lecturas.

Rugosidad

El modelo bidimensional utilizado emplea el parámetro de magnitud de la rugosidad k_s (del coeficiente de Chezy) para representar este tipo de resistencia al flujo. En el presente trabajo, los valores del parámetro k_s se asignaron en función del tipo de sustrato del cauce, como se muestra en las columnas una, tres y cuatro del cuadro 2, basándose en un proceso de calibración hecho al modelo de la hidrodinámica, en función de dicho parámetro, como se describe en los resultados del presente trabajo.

Datos complementarios de hábitat: sustrato y refugio. La información de hábitat se obtuvo a la par con las coordenadas de los 7 584 puntos de la batimetría, basándose en los tipos de sustrato y elementos de refugio que se encuentran en la primera columna del cuadro 2.

Sustrato. El sistema utilizado para la clasificación del sustrato, y los correspondientes códigos numéricos introducidos en el proceso de simulación del hábitat se basaron en la clasificación empleada por Platts *et al.* (1983), quienes toman como referencia la terminología

Cuadro 2. Clases de sustrato para asignar valores al coeficiente de magnitud de la rugosidad de Chezy (k_s), y codigos de sustrato para determinar la utilizacion y preferencia de habitat.

Tipo de sustrato	Codigo	Magnitud de la rugosidad, k_s (m)	Rango de tamanos (mm)
Limo (k_s asociado con las orillas del cauce)	1	0.1	0.062
Arena (k_s asociada con la presencia de formas de fondo)	2	0.2	0.062 - 2
Grava	3	$5^{>50}$	2-64
Cantos	4	$5O_{50}$	64 - 256
Bloques	5	$5D_{50}$	D > 256
Roca madre	6	2.0	
Vegetacion	7	3.0	
Arboles	8	5Da	
Matorral	9	3.0	

D50 = diametro de las particulas que constituyen el 50% de la muestra

Da = diametro del arbol.

y clases de tamaño aceptadas por la American Geophysical Union (AGU).

Refugio. El refugio se refiere a aquellos elementos del habitat que pueden ser utilizados por los organismos acuaticos para tal fin, y puede estar formado por cobertura, encueves, rocas y comisas. En el presente trabajo se utilizo una curva de preferencia denominada "sustrato" (ilustracion 4c), en la que se encuentran integrados elementos de sustrato propiamente dicho, asi como elementos de refugio.

- Calidad de las simulaciones efectuadas para diferentes caudales

Perfiles de flujo y de velocidades. Se compararon grafica y numericamente los perfiles de flujo y de velocidades obtenidos mediante la simulacion bidimensional efectuada para varios caudales, con los perfiles obtenidos en campo para los mismos caudales, y tomando como referenda los datos de las sesenta secciones transversales del tramo del estudio.

Simulacion del habitat

- Calculo del habitat potencialmente utilizable (HPU). Una vez efectuada la simulacion de la hidrodinamica fluvial para los caudales de interes, se procedio a determinar el HPU para la especie *Salmo trutta*, utilizando sus curvas de preferencia de habitat, asi como los indices de preferencia de sustrato de los 7 584 puntos topograficos levantados en campo. La clasificacion de los tipos de sustrato y los codigos mediante los cuales se les introdujo en el modelo de simulacion correspondiente, se encuentran en el cuadro 2.

- Curvas de preferencia de habitat. En la simulacion del habitat se utilizaron las curvas de preferencia de habitat de la especie *Salmo trutta* (ilustracion 4), desarrolladas por Garcia de Jalon (2000), con datos obtenidos por observacion directa, mediante buceo, conforme a la metodologia IFIM (Bovee, 1986). Las curvas de preferencia utilizadas son de categoria III (Bovee et al., 1998), corregidas por disponibilidad de habitat. La correccion se apoya en el principio de que los organismos seleccionan el habitat mas favorable, pero si no tienen disponible este tipo de habitat escogen otro dentro de las opciones que se les presentan; consiste en comparar la cantidad de habitat utilizado por los organismos con la cantidad disponible, obteniendo un indice de preferencia.

Las curvas de preferencia de habitat de las especies icticas integran los atributos de la celda de calculo (velocidad, profundidad, e indice de cauce) para estimar la cantidad y calidad del habitat. El indice de cauce se refiere al requerimiento de tipo de sustrato, refugio, o una combinacion de ambos. La unidad de medida que se utiliza es el habitat potencialmente utilizable (HPU), en metros cuadrados, por cada mil metros de longitud de rio. El calculo se efectua de acuerdo con la ecuacion (1):

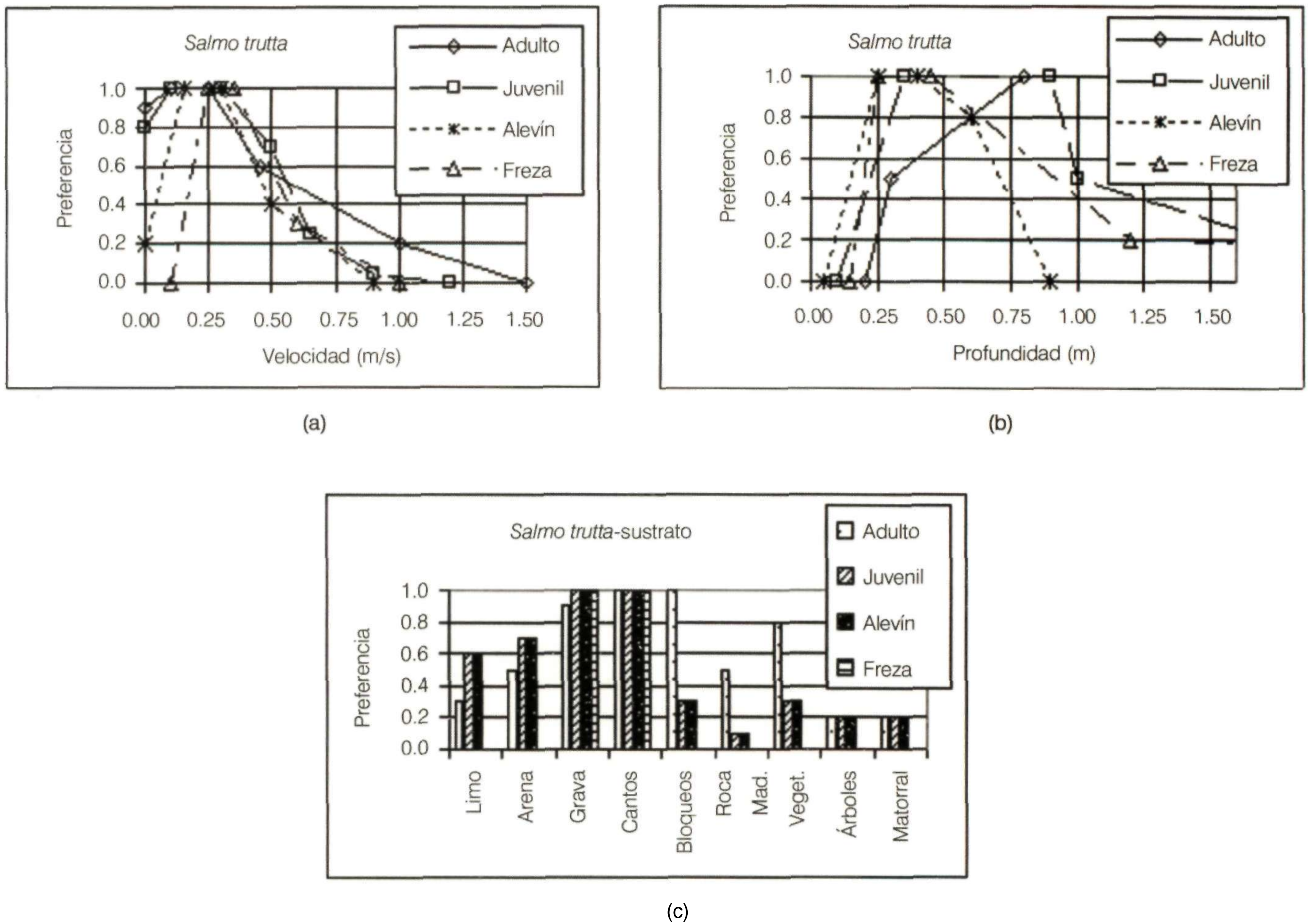
$$HPU = \frac{\sum^n I \cdot A \cdot FCC_j}{\text{Longitud.del.tramo}/(1000 \text{ metros})} \quad (1)$$

donde:

A = area representada por el elemento / a nivel de la superficie del agua.

FCC, = factor de conveniencia compuesto del elemento

Ilustracion 4. Curvas de preferencia de habitat de velocidad (a), profundidad (b) y tipo de sustrato (c) de la especie *Salmo trutta* (Garcia de Jalon, 2000).



El metodo mas comun para el calculo del factor de conveniencia compuesto (FCC) de una celda o elemento es el de la integracion multiplicativa, el cual se utiliza en el presente trabajo y se aplica a partir de la ecuacion (2) (Bovee et al., 1998).

$$FCC_i = V_j \cdot D_j \cdot S_i \quad (2)$$

donde:

V_j = conveniencia asociada con la velocidad en la celda o elemento j .

D_j = conveniencia asociada con la profundidad en la celda o elemento j .

S_i = conveniencia asociada con el indice de cauce en la celda o elemento i .

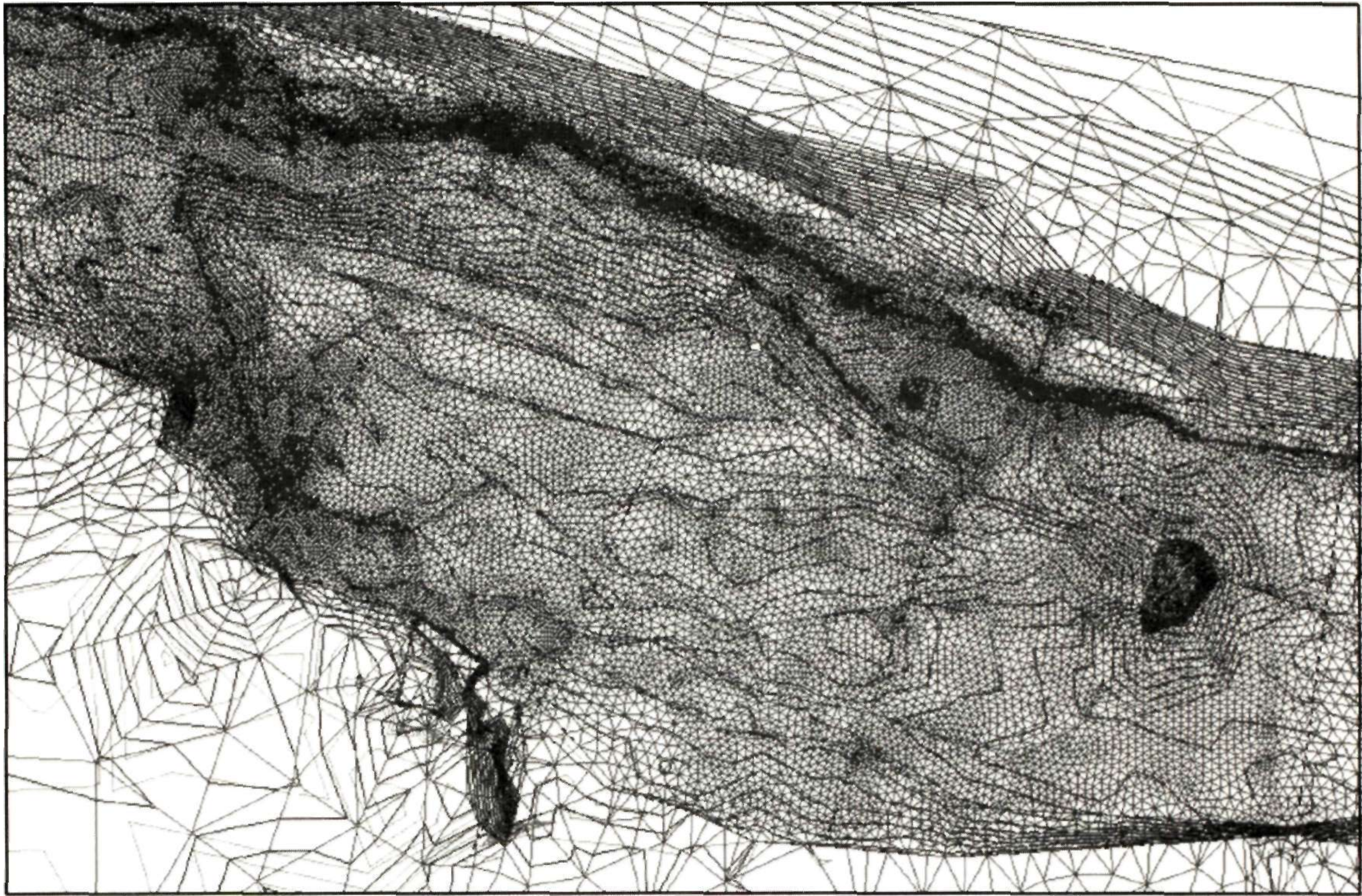
El calculo de HPU se efectua en cada celda o elemento en la que se simulo la velocidad y profundidad del agua.

Resultados

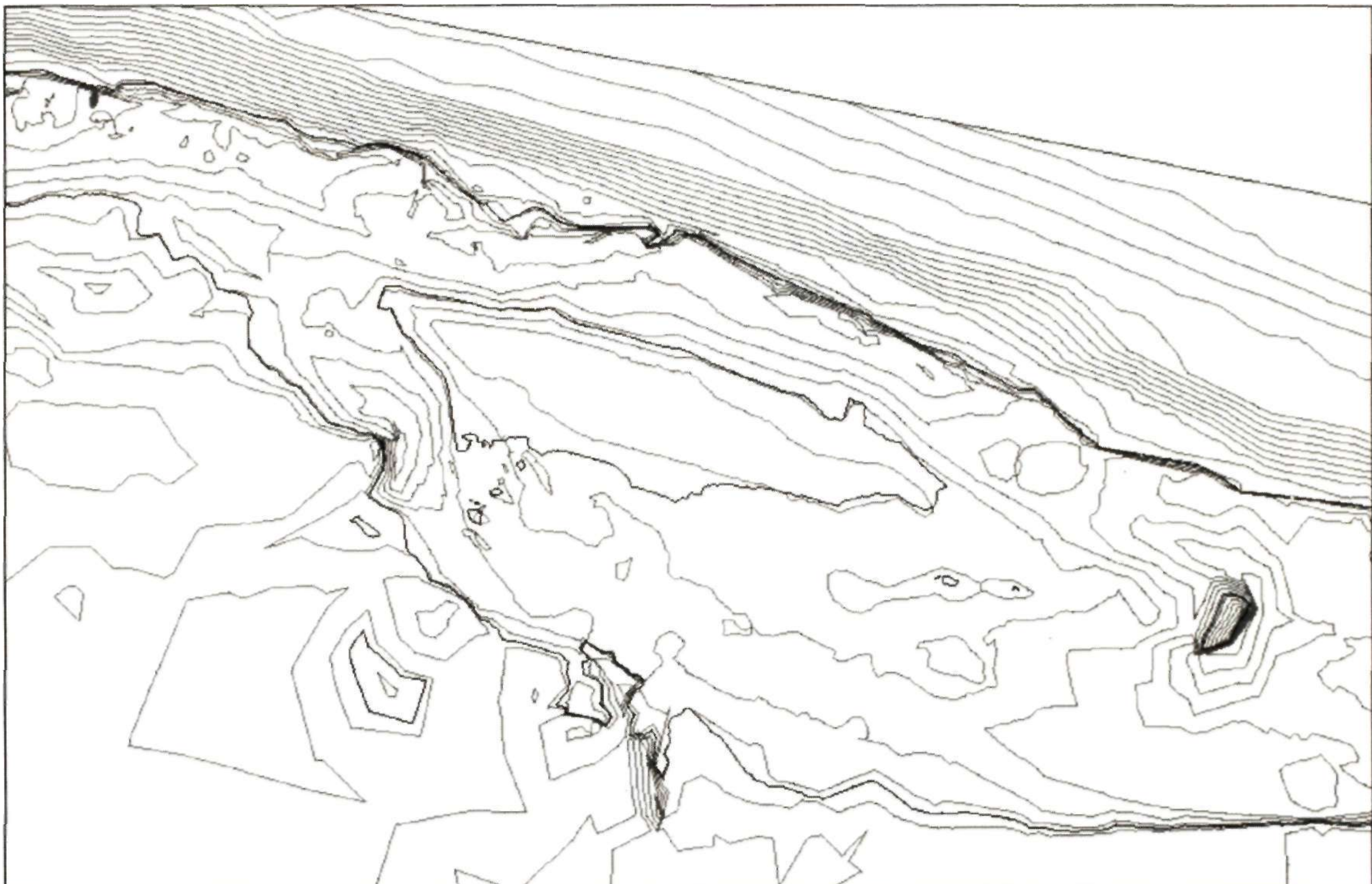
Mallas de calculo

Se utilizaron dos mallas de calculo, una formada por 69 558 nodos y 139 079 elementos, y otra formada por 24 384 nodos y 48 722 elementos. El proceso de elaboracion de las mallas consistio en ajustar la topografia generada con estas a la topografia obtenida en campo, mediante la utilizacion de elementos triangulares irregulares. En la ilustracion 5 se muestra una parte de una de las mallas de elementos finitos

Ilustracion 5. Malla de elementos finitos (a) y curvas de nivel obtenidas a cada 20 cm (b), de la zona de la isla superior.

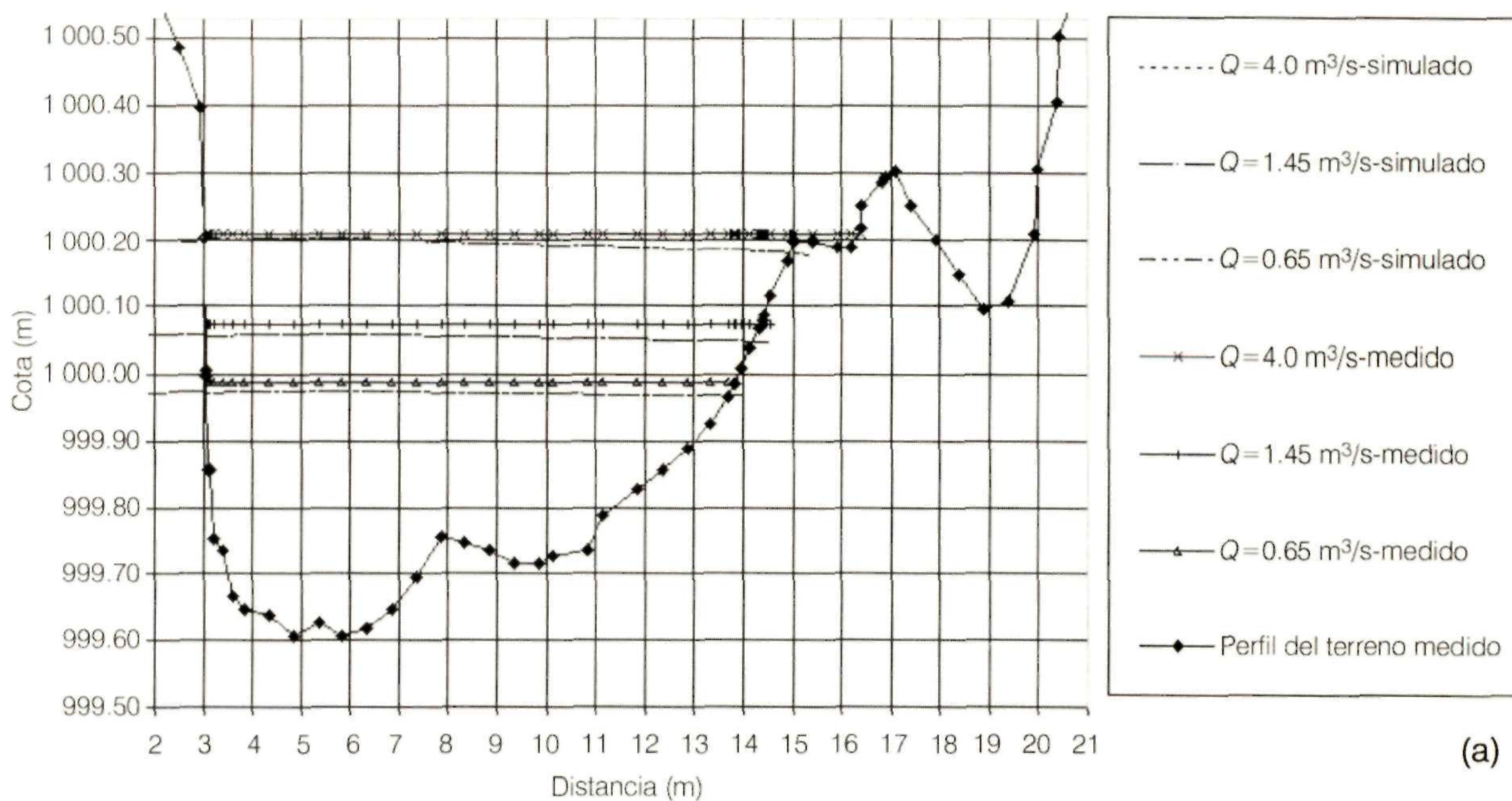


(a)

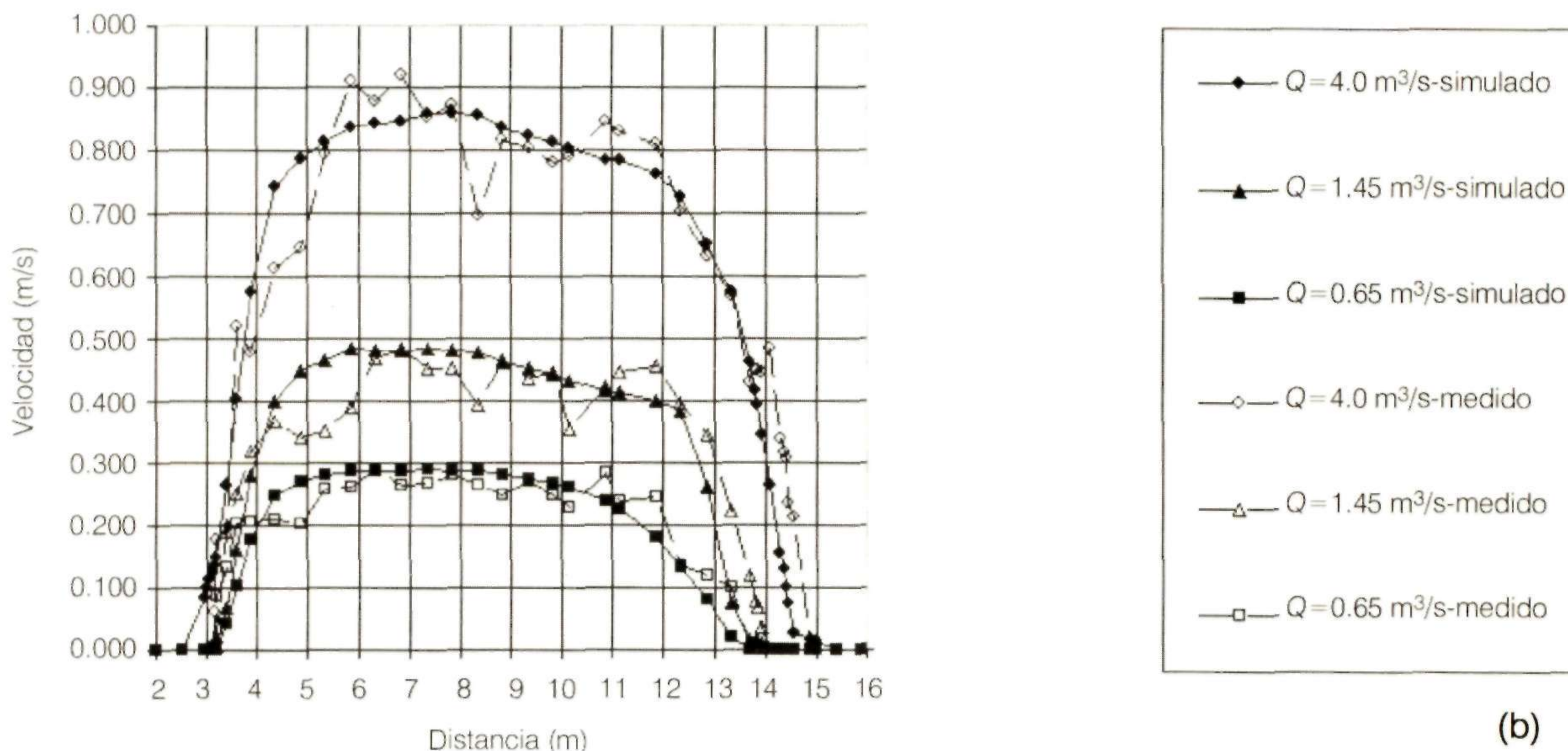


(b)

Ilustracion 6. Alturas de la superficie libre del agua (a), y velocidades (b), en la seccion transversal 1ª.



(a)



(b)

elaboradas, así como las curvas de nivel obtenidas cada veinte centímetros.

- Calibración del modelo en función de los perfiles de flujo. Además de la calidad en la definición del relieve del cauce para decidir con cuál de las dos mallas de elementos finitos se realizaría la simulación hidrodinámica de los caudales adicionales al de calibración, se utilizaron los resultados del proceso de calibración del modelo de la hidrodinámica. La calibración se efectuó

en función de los datos de campo obtenidos para el caudal de $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$, que es el mayor para el que se contó con datos de alturas de la superficie libre del agua (ASLA's) y velocidades, y utilizando dos archivos de valores del parámetro de magnitud de la rugosidad k . En primera instancia se efectuó la calibración del modelo de la hidrodinámica fluvial para las dos mallas antes mencionadas y utilizando un archivo de valores del parámetro de magnitud de la rugosidad k_s , en el que a este se le dieron los valores que se encuentran en el

cuadro 2 ($5D_{50}$ para los materiales granulares-gravas, cantos y bloques).

Debido a la pequeña diferencia que se encontró en los resultados de la calibración del modelo para las ASLA's y velocidades obtenidas con las dos mallas, la escasa diferencia en los resultados de la discretización de la topografía del terreno, y el requerimiento de un tiempo de cómputo significativamente menor para la malla de 24 384 nodos, se decidió calibrar el modelo, en segunda instancia, solo con la malla de 24 384 nodos para un segundo archivo de valores del parámetro de magnitud de la rugosidad, con $k_s=2D_{50}$ para los materiales granulares (gravas, cantos y bloques).

De las simulaciones hechas con la malla de 24 384 nodos y los dos archivos de valores del parámetro k_s ($2D_{50}$ y $5D_{50}$ para los materiales granulares), se obtuvo que la media de los errores medios absolutos de calibración de las alturas de las ASLA's ($EACM_{ASLA}$) de las 39 secciones transversales del cauce principal fue de 3.9 y 1.4 cm, para los valores de $k_s=2D_{50}$ y $k_s=5D_{50}$, respectivamente, siendo mejor, por lo tanto, en 2.5 cm la simulación de las ASLA's, al utilizar un $k_s=5D_{50}$ mientras que en el caso de las 21 secciones de los cauces secundarios, la media de los $EACM_{ASLA}$ resultó de 2.8 y 1.6 cm, respectivamente, siendo mejor en 1.2 cm la simulación de las ASLA's, al utilizar un $k_s=5D_{50}$.

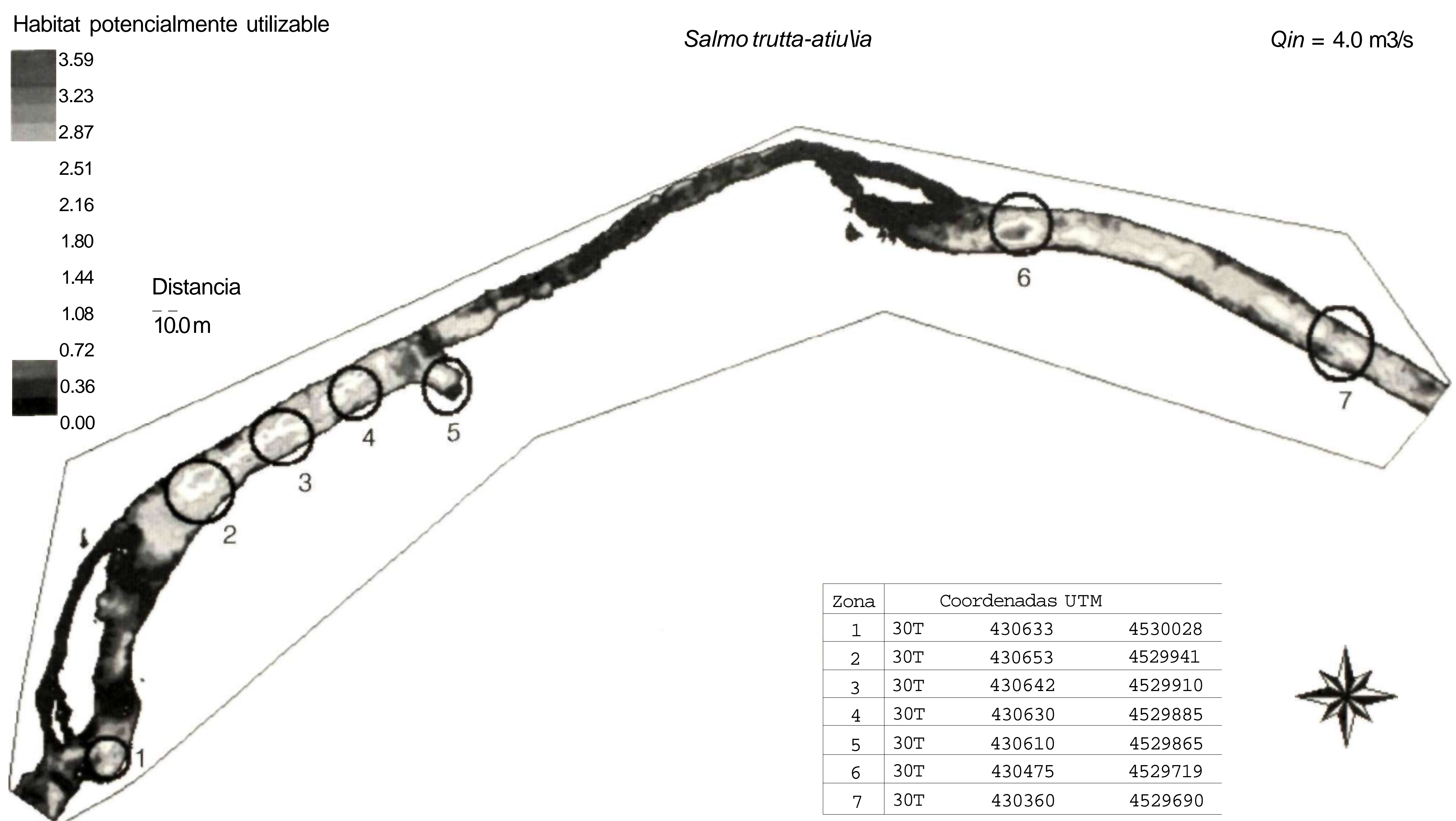
Por lo tanto, para efectuar las simulaciones de la hidrodinámica para el resto de caudales de interés se eligió la malla de 24 384 nodos y el archivo de valores en el que el parámetro $k_s=5D_{50}$ para los materiales granulares (gravas, cantos y bloques).

- Simulación de los caudales de predicción (1.45, 0.65 y 1.97 m³/s)

Calidad de la simulación de los perfiles de flujo. Para evaluar la calidad de los resultados de la simulación de los perfiles de flujo se compararon gráficamente y numéricamente las ASLA's obtenidas mediante simulación con las medidas para las sesenta secciones transversales distribuidas en el tramo del estudio. En la revisión gráfica se utilizaron perfiles longitudinales, así como ilustraciones similares a la ilustración 6, en las que se observó, en términos generales, un buen ajuste de las alturas de la superficie del agua simuladas respecto a las medidas, lo que se constató numéricamente.

Calidad en la simulación de las velocidades. Una vez calibrado el modelo para los perfiles de flujo a caudal alto (4.0 m³/s) y efectuadas las simulaciones correspondientes al resto de caudales de interés, se obtuvo la distribución de velocidades en todo el tramo

Ilustración 7. Distribución del HPU para la especie *Salmo trutta* en su estadio adulto, para el caudal de 4.0 m³/s. Las circunferencias indican las zonas en las que el habitat tiene mayor calidad para este caso.



del estudio, y a partir de esta se extrajo la distribución en cada una de las sesenta secciones transversales, con la finalidad de revisar gráficamente y numéricamente su discrepancia respecto a las velocidades medidas en las mismas secciones.

La ilustración 6 muestra las alturas de la superficie libre del agua y la distribución de las velocidades medidas y las simuladas en la sección transversal 1A. En esta sección, así como en el resto, se considera que se logró un ajuste satisfactorio de las alturas del agua y velocidades simuladas respecto a las medidas.

- Simulación del hábitat ictiológico

Calculo del hábitat potencialmente utilizable (HPU). Se obtuvieron 12 mapas de distribución del HPU relativos a la especie *Salmo trutta* y sus correspondientes estadios de desarrollo. En la ilustración 7 se presenta uno de estos mapas, en el que se han marcado con circunferencias las zonas en las que el HPU es de mayor calidad para la especie *Salmo trutta* en su estadio adulto. Cabe mencionar que estas zonas coinciden con sitios ubicados en pozas.

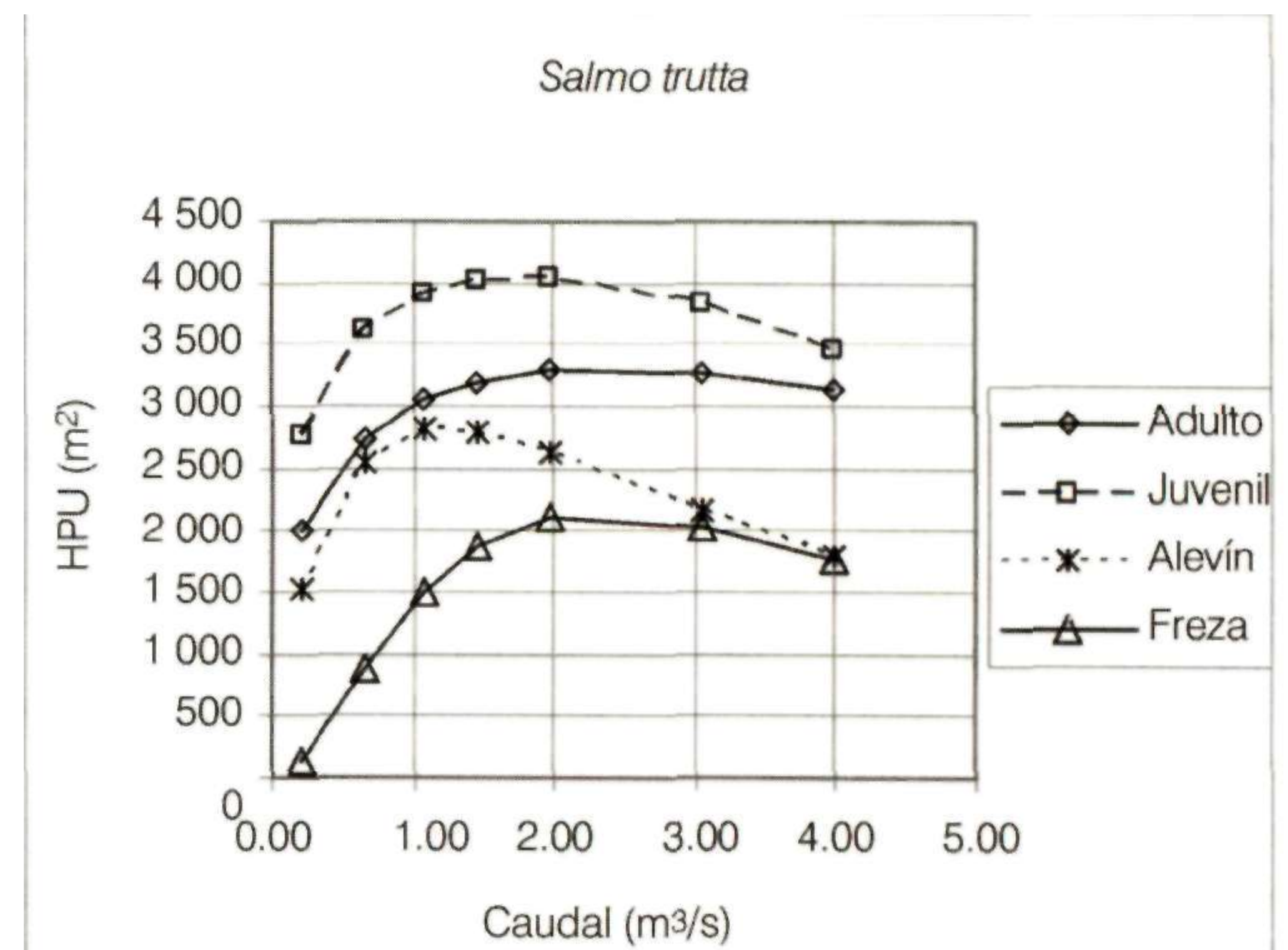
Los resultados numéricos de la determinación del hábitat potencialmente utilizable (HPU) para la especie *Salmo trutta* y sus correspondientes estadios de desarrollo se encuentran en el cuadro 3, y su representación gráfica en la ilustración 8.

El comportamiento numérico (cuadro 3) y gráfico (ilustración 8) denota una marcada tendencia inicial ascendente del hábitat potencialmente utilizable (HPU) a caudales bajos para los cuatro estadios de desarrollo de la especie *Salmo trutta*, y el caudal que maximiza el HPU se define claramente en 1.97 m³/s para los estadios adulto, juvenil y freza, y 1.08 m³/s para el estadio alevín.

Cuadro 3. Hábitat potencialmente utilizable (HPU) por la especie *Salmo trutta*, en sus estadios adulto, juvenil, alevín y freza, en el tramo de estudio del río Lozoya.

Q m ³ /s	Estadio de vida			
	Adulto HPU m ²	Juvenil HPU m ²	Alevín HPU m ²	Freza HPU m ²
0.20	2017	2 753	1 525	134
0.65	2 725	3 608	2 555	886
1.08	3 049	3 912	2 808	1 510
1.45	3 201	4 028	2 798	1 876
1.97	3 287	4 040	2 623	2 105
3.04	3 256	3 826	2 169	2 036
4.00	3144	3 464	1 784	1 767

Ilustración 8. Curvas caudal-hábitat potencialmente utilizable obtenidas para la especie *Salmo trutta*.



Conclusiones

La utilización de un modelo bidimensional de la hidrodinámica para efectuar la simulación de las alturas de la superficie libre del agua (ASLA's) y de las velocidades aportó resultados adecuados para la simulación del hábitat en el tramo del estudio del río Lozoya.

Las curvas caudal-hábitat potencialmente utilizable (Q-HPU) obtenidas para la especie *Salmo trutta* y sus correspondientes estadios de desarrollo permitieron estimar, con claridad, el caudal que maximiza el HPU para los cuatro estadios de desarrollo: 1.97 m³/s para los estadios adulto, juvenil y freza, y 1.08 m³/s para el estadio alevín; además de mostrar una tendencia inicial marcadamente ascendente del HPU a caudales bajos para los cuatro estadios de desarrollo de la especie objetivo.

Las curvas Q-HPU y los caudales que maximizan el HPU que se obtuvieron en el presente trabajo constituyen información valiosa para los usuarios y gestores de los recursos fluviales del río Lozoya, con miras a establecer un régimen de caudales ecológicos que permita conservar el ecosistema correspondiente, así como evaluar, en su caso, los impactos relacionados con posibles modificaciones del régimen de caudales.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada a Ezequiel García Rodríguez para efectuar estudios de doctorado. Se agradece a Javier Herranz, Carlos Alonso, Javier

Gortazar y Pilar Vizcaino por su invaluable ayuda en la obtención de la información de campo.

Recibido: 23/01/2008
Aprobado: 04/09/2008

Referencias

- BOVEE, K.D., LAMB, B.L., BARTHLOW, J.M., STALNAKER, C.B., TAYLOR, J. and ENRIKSEN, J. *Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*. Fort Collins: Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report USGS/BRD-1998-0004, 1998, VIII + 131 pp.
- BOVEE, K.D. *Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the Instream Flow Incremental Methodology*. Instream Flow Paper 21. Fort Collins: US Fish and Wildlife Service, 1986, 235 pp.
- BOVEE, K.D. *A guide to stream habitat analysis using the Instream Flow incremental Methodology*. Instream Flow information Paper 12. Fort Collins: US Fish and Wildlife Service, FWS/OBS 82/86, 1982, 248 pp.
- FERNANDEZ, L. *Monografía Geológica del Valle del Lozoya*. Madrid: Imprenta Clasica Espanola, 1915, 100 pp.
- GHANEM, A., STEFFLER, P., HICKS, F. and KATOPODIS, C. *Two-Dimensional Finite Element Modelling of Flow in Aquatic Habitats*. Edmonton, Canada: University of Alberta, 1995, 122 pp.
- GARCIA, E. *Modelización de la hidrodinámica fluvial en una y dos dimensiones aplicada a la simulación del hábitat físico ictiológico en un tramo del río Lozoya*. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2004, 238 pp. + anexos.
- GARCIA DE JALON, D., SCHMIDT, G. y GONZALEZ DEL TAN AGO, M. *La pesca en las aguas de la Comunidad de Madrid*. Madrid: Ed. Mundi-Prensa, S.A., 2002, 159 pp.
- GARCIA DE JALON, D. *Cuervas de preferencia de hábitat de la especie Salmo trutta*. Comunicación personal. Información inédita. 2000.
- HERSCHY, R.W. (editor). *Hydrometry. Principles and practices*. Segunda edición. Chichester, West Sussex, England: John Wiley and Sons, Inc., 1999, 376 pp.
- KARR, J.R., FAUSCH, K.D., ANGERMEIER, P.L., YANT, P.R. and SCHLOSSER, I.J. *Assessing Biological Integrity in Running Waters a Method and Its Rationale*. Illinois Natural History Survey. Special Publication, 1986, 28 pp.
- LAFLEUR, J. and LECLERC, M. *The Fish Habitat Modeling with Two-Dimensional Hydraulic Tools: a Worthwhile Approach for Setting Minimum Flow Requirements?* Instream and Environmental Flow Symposium, Houston, Texas, December, 1997, 25 pp.
- MASACHS, V. *El régimen de los ríos peninsulares*. Barcelona: CSIC-Instituto de Investigaciones Geológicas, 1948, 511 pp.
- PLATTS, W.S., MEGAHAN, W.F. y MINSHALL, G.W. *Methods for evaluating stream riparian, and biotic conditions*. Ogden: USDA Forest Service, General Tech. Report. INT-138, 1983, 70 pp.
- REISER, D.W., WESCHE, T.A. and ESTES, C. Status of instream flow legislation and practice in North America. *Fisheries*. Vol. 14, no. 2, 1989, pp. 22-29.
- STALNAKER, C., LAMB, B.L., HENRIKSEN, J., BOVEE K. and BARTHLOW, J. *The Instream Flow Incremental Methodology, A primer for IFIM*. Biological Report 29. Washington, D.C.: US Department of the Interior, National Biological Service, 1995, 44 pp.
- STEFFLER, P. and BLACKBURN, J. *River2D-Two-Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat*. User's Manual. Alberta: University of Alberta, 2002, 119pp.
- TARBET, K. and HARDY, T.B. *Evaluation of one-dimensional and two dimensional hydraulic modelling in a natural river and implications in instream flow assessment methods*. Ecohydraulics 2000. Volume B. Second International Symposium on Habitat Hydraulics, Quebec, 1996, pp. 396-406.
- TENNANT, D.L. *Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. Proceedings on Stream Flow Needs Symposium*. Billings, Montana, 1976, pp. 359-373.
- THARME, R.E. *A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trends in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers*. *River Research and Applications*. Vol. 19, Wiley InterScience, 2003, pp. 397-441.
- USFWS. *Comparison of PHABSIM and 2-D Modeling of Habitat for Steelhead and Fall-Run Chinook Salmon Spawning in the Lower American River*. Study Report. Sacramento: United States Fish and Wildlife Service, 2003, 22 pp. -I- anexos.
- WADDLE, T.J., STEFFLER, P., KATOPODIS, C. and LOCKE, A. Comparison of one and two-dimensional open channel flow models for a small habitat stream. *Rivers*. Vol. 7, no. 3, 2000, pp. 205-220.
- WADDLE, T.J. *PHABSIM for Windows: user's manual and exercises*. Fort Collins: US Geological Survey, Open-File Report 01-340, 2001, 288 pp.

Abstract

GARCIA-RODRIGUEZ, E., MARTINEZ-AUSTRIA, P.F., GARCIA DE JALON-LASTRA, D.M. & OCHOA-FRANCO, L.A. Determination of the weighted usable area for Salmo trutta species in a stretch of the Lozoya River, Spain. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXIV, no. 1, January-March, 2009, pp. 19-32.

This manuscript presents the estimation of the Weighted Usable Area (WUA) and the flows that maximize it for adult, juvenile, fry and spawn life stages of Salmo trutta (common trout), a valuable species for sport fishing and human consumption. To this end, following the Instream Flow Incremental Methodology (IFIM), a physical habitat simulation was carried out in a 609-m stretch of the Lozoya River (Madrid, Spain), using a two-dimensional model of the hydrodynamics, a model for habitat simulation, and habitat preference models for the target species. Hydraulic, geomorphological, and biological information, as well as that related to the specific characteristics of the river habitat were obtained in field and used as input for the models. Weighted Usable Area values obtained for the Salmo trutta species allowed to determine that a 1.97- m³/s flow rate maximizes the WUA for the adult, juvenile and spawn life stages, and 1.08-m³/s flow rate maximizes the WUA for the fry life stage. The WUA-Flow curves obtained in this work provide valuable information to users and managers of the Lozoya River to determine instream flow needs and, if necessary, assess impacts related to modification of flow regime.

Keywords: weighted usable area-flow curve, Salmo trutta, Lozoya River, habitat simulation, two-dimensional fluvial hydrodynamics simulation, IFIM, habitat preference curves, instream flow needs.

Direccion institucional de los autores:

Dr. Ezequiel Garcia-Rodriguez

Profesor e investigador
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo
Departamento de Ingeniera Sanitaria y Ambiental
Facultad de Ingeniera Civil
Edificio del Posgrado de Ingeniera Civil
Ciudad Universitaria
58040 Morelia, Michoacan, Mexico
telefono: + (52) (443) 322 3500, extension 4346
fax: + (52) (443)304 1002
ezgarciarod@hotmail.com

Dr. Polioptro F. Martinez-Austria

Director general
Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua
Paseo Cuauhnahuac 8532
Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, Mexico
telefono: + (52) (777) 329 3600, extension 554
fax: + (52) (777) 319 3742
director_general@tlaloc.imta.mx

Dr. Diego M. Garcia de Jalon-Lastra

Subdirector de Alumnos
Universidad Politecnica de Madrid
ETSI de Montes
Departamento de Ingeniera Forestal
Ciudad universitaria s/n
28040 Madrid, Espana
telefono: (34) (91)336 6385
fax: (34) (91)336 6386
diego.gjalon@upm.es

Dr. Luis A. Ochoa Franco

Profesor e investigador
Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo
Departamento de Ingeniera Sanitaria y Ambiental
Facultad de Ingeniera Civil
Edificio del Posgrado de Ingeniera Civil
Ciudad Universitaria
58040 Morelia, Michoacan, Mexico
telefono: + (52) (443) 322 3500, extension 4342
fax: + (52) (443) 304 1002
luis-o@alumni.cmu.e