

Optimización ambiental y funcional de estaciones de aforo V-Flat a través de técnicas de modelación hidráulica unidimensional y bidimensional. SAIH del Tajo.

José Antonio Hinojal Martín¹, Roberto Navas Cuesta², José Luis Lorenzo Riera³

¹ *Confederación Hidrográfica del Tajo (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino)*

^{2,3} *Oficina Técnica de Estudios y Control de Obras, S.A. (OFITECO)*

¹joseantonio.hinojal@chtajo.es ²rnavas@ofiteco.es ³jllorenzo@ofiteco.es

1 Introducción

Las estaciones de aforo de tipología V-Flat se han convertido en un referente de calidad y precisión para el control de caudal en río. Su órgano de vertido, en forma de V tendida, permite un vertido crítico ($Froude = 1$) que se mantiene para un amplio rango de caudales. Estas características funcionales, aplicadas a un entorno mediterráneo en el que destaca la alta variabilidad hidrometeorológica, han favorecido su aceptación e implantación en el ámbito nacional.

El Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) del Tajo, en su fase inicial de diseño, fue uno de los primeros organismos en decantarse por esta tipología de estación para determinados puntos de control donde las características hidrológicas hacen necesario el control fiable de un amplio rango de caudales. En su mayoría se trata de puntos de control en zonas de cabecera.

No obstante, esta tipología de estación de aforo no está exenta de problemas, tanto de carácter ambiental como funcional. La problemática ambiental está asociada a la dificultad de franqueo del obstáculo del vertedero de la estación por la ictiofauna, lo que constituye una cuestión ampliamente tratada en diversos estudios especializados (Sanz Ronda et al., 2010), y que, por parte del SAIH del Tajo, se ha materializado en la progresiva implantación de estructuras de paso piscícola en estos sistemas de aforo. Por otro lado, la singularidad morfológica de esta tipología de estación, junto con determinadas condiciones del cauce natural donde se ubican algunas de ellas, han propiciado que algunos de estos puntos de medida no alcancen un funcionamiento óptimo, con la aparición de distintas problemáticas, como el depósito de restos sedimentarios que modifican la sección efectiva de la estación, irregularidades o asimetrías en el flujo, y otros efectos hidrodinámicos. Tales efectos, en general, tienen una incidencia relativamente pequeña en la precisión de las medidas de caudal, aunque pueden ser de importancia en cuestiones relativas a la durabilidad y mantenimiento de estas estaciones de aforo, especialmente por los depósitos de sedimentos.

En el presente artículo se describen, de forma general, dos estudios piloto enfocados a resolver estas problemáticas, mediante la aplicación de modelos numéricos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales en el diseño de las soluciones a implantar para la mejora ambiental y funcional de las estaciones de aforo V-Flat, dentro de los trabajos de continua mejora y optimización del Sistema del SAIH del Tajo.

En el primero de los estudios tratados se presenta el análisis realizado para la validación funcional e hidráulica de una escala de peces diseñada para una estación actual del SAIH Tajo, e incluida en el ya redactado “Proyecto de ampliación de trece nuevos puntos de control de la red SAIH Tajo”. En el segundo caso se tratan, a través de la modelación bidimensional, aquellos posibles problemas hidrodinámicos que inciden sobre el propio funcionamiento de este tipo de estructuras y que deben ser tenidos en cuenta desde la fase de selección del emplazamiento hasta el diseño hidráulico de la estación de aforo, o de su reforma y acondicionamiento.

Para valorar cuáles son los efectos hidráulicos que envuelven estas situaciones, se ha realizado la modelización con el software informático Iber v1.6 (Modelo de flujo bidimensional en ríos y estuarios) del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) del Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. Se trata de un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. Así mismo, se ha empleado el software de flujo unidimensional HecRas v4.1 de forma complementaria para determinados aspectos del trabajo.

2 Problemática ambiental

El rigor hidráulico de la tipología de aforo V-FLAT contrasta con el impacto medioambiental que provocan como barrera infranqueable para la mayoría de los peces ibéricos, generando su aislamiento y disminuyendo su potencialidad biológica al limitar los movimientos reproductivos, el intercambio biológico y la colonización de nuevos territorios.

En el caso del aforador AR40, ubicado en un tramo de elevado interés medioambiental y cinegético derivado de la pesca, surge la necesidad de dotar a la estructura de un sistema de franqueo orientado al remonte de las poblaciones de boga (*chondrostoma polylepis*) y de barbo común (*barbas bocagei*), que desde el embalse de Gabriel y Galán inician sus migraciones prereproductivas para acceder a los frezaderos ubicados aguas arriba del citado aforador.



Figura 1 Imágenes de la estación de aforo V-Flat modelizada

La imposibilidad de franqueo de la estructura V-flat viene determinada principalmente por los siguientes factores hidráulicos:

- Velocidades excesivas en el paramento de aguas abajo (3,5 – 4 m/s), sólo franqueables por aquellos ejemplares más atléticos de pocas especies.
- Profundidades insuficientes para la natación con caudales medios y bajos (< 0,1m).
- Desnivel elevado entre la cota de la lámina de agua de aguas arriba y abajo (>0,5m), que imposibilita el salto y aumenta la distancia a recorrer.
- Existencia de amplios torbellinos en ambos lados del resalto hidráulico provocando turbulencias que desorientan al pez.

Para mitigar estos efectos se ha optado por la colocación de un dispositivo de franqueo, en la rampa de salida de la estación, compuesto por una sucesión de artesas que generan una serie de estanques escalonados que proporcionan unas condiciones hidráulicas favorables al remonte de la ictiofauna objetivo.

El diseño del dispositivo nace a través del “Informe de predimensionamiento de la escala de peces en el aforo AR40” del 8 de Julio de 2002, en el que se establece tanto la tipología como las características del mismo.

Partiendo de un desnivel máximo de 1,25 m entre la cresta del vertedero y la solera final de la rampa, se diseñan un total de 6 tabiques sucesivos con dos niveles de vertido (véase Figura 2), la parte central de los tabiques presentan una cota de vertido inferior con la finalidad de permitir el paso de acarreos, y pequeños orificios para permitir el paso de ejemplares de menor tamaño y capacidad natatoria.

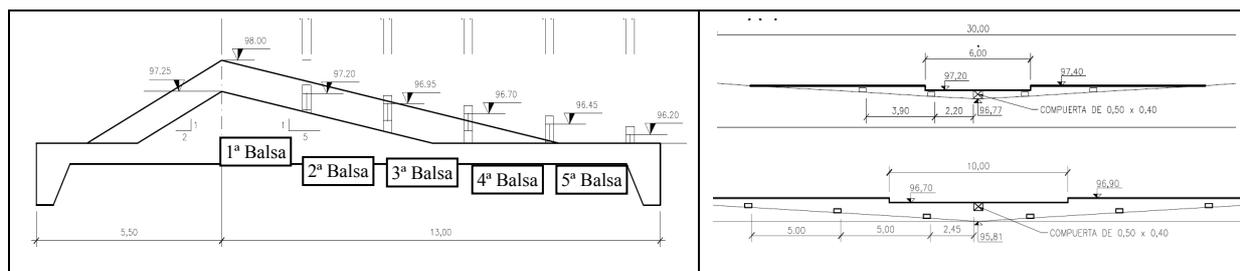


Figura 2 Izquierda: Sección longitudinal del aforador AR40 con el dispositivo de franqueo de estanques sucesivos. Derecha: Ejemplo del diseño de las artesas (artesas 1ª y 3ª).

En el diseño inicial, elaborado en el informe ya citado, se justifica a través de cálculos hidráulicos que este tipo de estructura, y para el caudal de cálculo (caudal medio del tramo de 5,66 m³/s), crea unas condiciones hidráulicas favorables para el remonte ya que cumple con los siguientes condicionantes: no se generan saltos hidráulicos entre los sucesivos estanques superiores a 0,3 m, las velocidades del flujo son inferiores a 1,5 m/s y los calados que se dan a lo largo de la estructura nunca son inferiores a 0,15 m.

2.1 Modelación numérica del sistema de franqueo

Partiendo del diseño expuesto, y con la finalidad de contrastar y verificar el cumplimiento de las condiciones hidráulicas que harían de la escala un sistema de paso favorable, y de forma añadida, evaluar el efecto que sobre la estación como instrumento aforador tendría la colocación de la escala, se han desarrollado una serie de modelos unidimensionales y bidimensionales con los software Hec-Ras v4.1 e Iber v1.6 respectivamente.

2.1.1 Modelación unidimensional

Las virtudes de la modelación unidimensional en Hec-Ras, pasan por la elevada precisión en la construcción de las geometrías, su velocidad de cálculo y su amplio espectro de posibilidades a la hora de exportar y visualizar los resultados de la simulación.

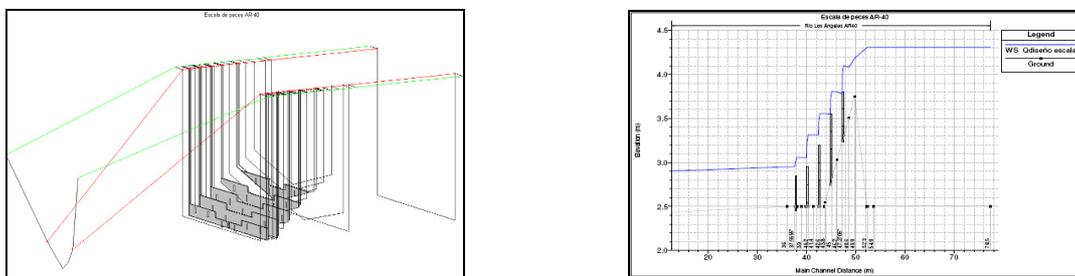


Figura 3 Izquierda: Geometría de la estación con la escala para peces en Hec-Ras. Derecha: Perfil longitudinal de la estación y lámina de agua resultante del caudal de simulación, donde se hacen visibles los saltos hidráulicos entre las distintas balsas.

A continuación se presentan los resultados de las variables hidráulicas de interés para la validación de la escala de peces a través de la modelación en Hec-Ras.

Tabla 1 Resultados hidráulicos significativos del dispositivo de franqueo diseñado

Sección	Descripción	Calado (m)	Velocidad (m/s)	nº Froude	Salto (m)
54,80	Estación	1,81	0,10	0,02	
49,80	Vertedero				0,23
48,60	1ª Balsa	0,57	0,87	0,52	
47,40	Artesa nº 1				0,28
46,20	2ª Balsa	0,77	0,47	0,24	
45,00	Artesa nº 2				0,25
43,80	3ª Balsa	1,00	0,30	0,12	
42,60	Artesa nº 3				0,24
41,40	4ª Balsa	0,82	0,29	0,12	
40,20	Artesa nº 4				0,26
39,80	5ª Balsa	0,56	0,34	0,15	
37,80	Artesa nº 5				0,11
36,00	Final de escala	0,45	0,42	0,20	

Como muestran los resultados de la modelación, la altura de los saltos hidráulicos entre cada uno de los niveles, se encuentra dentro del límite establecido de 0,3 m. Así mismo, tanto la velocidad, con un valor máximo de 0,87 m/s, como el calado, con un valor mínimo de 0,45 m, se mantienen en valores adecuados.

Por otro lado, y desde el punto de vista de la estación como instrumento aforador, hay que matizar que la tipología V-flat genera una sección crítica en el régimen de flujo, lo que permite que la relación del caudal circulante venga definida únicamente por la geometría de la sección; con efectos despreciables a cambios de rugosidad y nulos los derivados de variaciones en las condiciones hidráulicas de aguas abajo, lo que se traduce en una medida de niveles precisa en la sección de medida. No obstante, estas condiciones estables de medición están limitadas (límite modular) a la máxima relación entre las alturas de energía aguas abajo y arriba de la sección de control, referidas al nivel de coronación del vertedero (vertedero sumergido). Evidentemente, la colocación de la escala tendrá efectos negativos sobre esta capacidad al obstaculizar el flujo en la rampa de salida de la estación generando una sobreelevación de la lámina de agua.

Por todo ello, se ha considerado adecuado establecer el caudal asociado al límite modular de la situación inicial, que fijará el rango de caudales capaz de aforar la estación en condiciones estables, y posteriormente contrastar este valor con el obtenido con la colocación de la escala.

De esta comprobación hidráulica se ha obtenido que el límite modular de la estación actual se encuentra en torno a los 158 m³/s, y que tras la colocación de la escala éste disminuiría hasta aproximadamente 83 m³/s, lo que supone una reducción de aproximadamente el 50 %.

A pesar de que pudiera parecer una disminución excesiva, el hecho de que el vertedero quede sumergido no implicaría necesariamente una medición errónea, dependerá de las condiciones de contorno de aguas abajo del emplazamiento. Normalmente estas condiciones permanecerán invariables por lo que será necesario recalibrar la curva de gasto a través de aforos directos en el entorno de la sección.

2.1.2 Modelación bidimensional

Una de las ventajas que la modelación bidimensional ofrece en relación a la unidimensional, es la posibilidad de conocer con precisión el comportamiento hidráulico en cualquier punto del modelo (dependiente de la precisión del mallado), así como la dirección real del flujo.

Con esta modelación se ha pretendido cotejar los resultados de la modelación unidimensional analizando ahora cuál es el comportamiento hidráulico de forma distribuida. Cabe indicar que, para esta simulación, se ha simplificado la geometría eliminando los orificios de las artesas debido a la complejidad de su inclusión en un mallado bidimensional de tan reducidas dimensiones.

En la *Figura 4* se muestran los resultados obtenidos en esta nueva simulación.

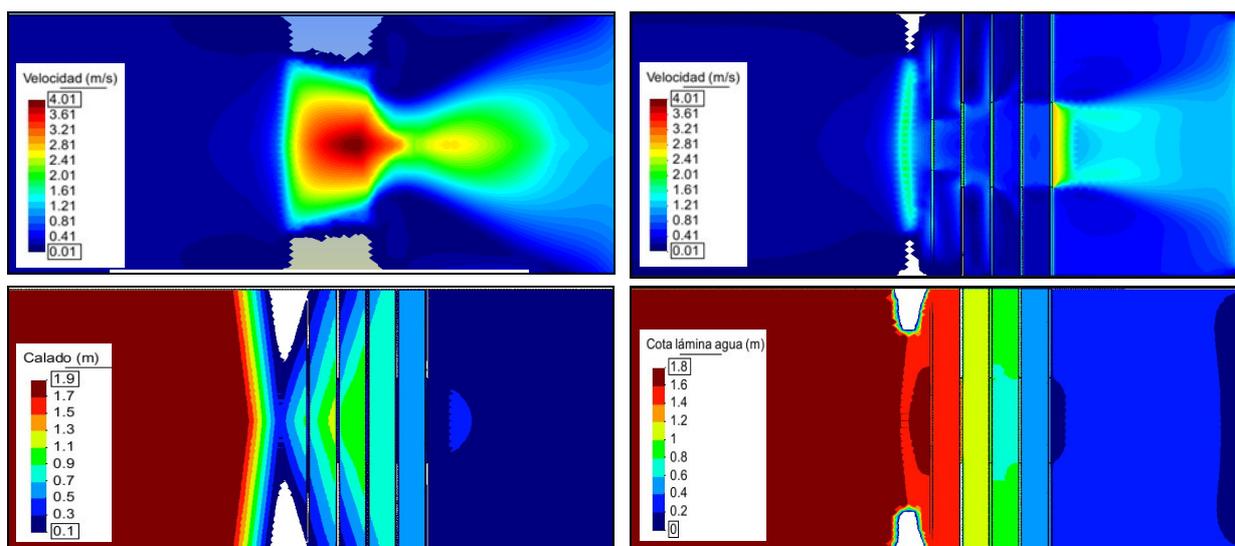


Figura 4 superior-Izquierda: Rango de velocidades en situación actual (sin escala). Superior-Derecha: Rango de velocidades en la geometría con escala. Inferior-Izquierda: Rango de calados en la geometría con escala. Inferior-Derecha: Rango de cotas de lámina de agua en la geometría con escala.

Como se desprende de los resultados, la modelación bidimensional corrobora la idoneidad del diseño para el franqueo del aforador, con velocidades, calados y saltos hidráulicos dentro de los límites establecidos en el diseño.

Así mismo, y como se muestra en la *Figura 5* con la representación de los vectores de la velocidad del flujo, no se aprecian zonas de recirculación o torbellino que puedan desorientar en su escalada a las especies remontantes.

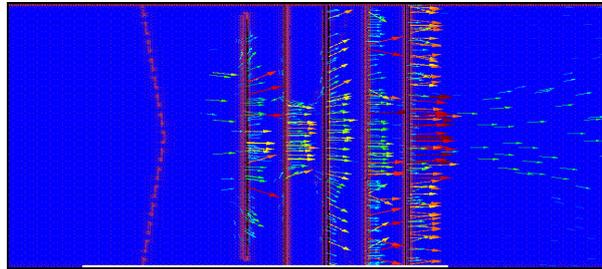


Figura 5 Vectores de velocidad del flujo.

3 Anomalías funcionales

A través de la modelación bidimensional, demostrando la utilidad práctica de esta herramienta en la optimización y diseño de estaciones de aforo, se ha llevado a cabo un análisis de las posibles circunstancias que generan un inadecuado funcionamiento en las estaciones de aforo de tipología V-flat afectando a la fiabilidad de la medición.

La colocación de aforadores V-flat implica un cambio sobre las condiciones hidráulicas naturales del entorno como resultado de la obstaculización del flujo. El que estas modificaciones tengan repercusión sobre el propio funcionamiento del órgano de medida dependerá del diseño de la estructura en relación al cauce natural que la alberga.

Lógicamente, por parte de los sistemas de control hidrológico, existe un gran interés por registrar no sólo caudales ordinarios, sino también aquellos considerados extraordinarios, permitiendo su control y gestión. Esta situación conduce, en ocasiones, a un diseño de las estaciones basado en caudales muy alejados de las características hidrológicas reales del entorno ribereño que las alberga, lo que puede llegar a suponer un desequilibrio local en los procesos hidrodinámicos de erosión, transporte y sedimentación.

Otra circunstancia que puede acarrear un funcionamiento anómalo de la estación es su disposición respecto al eje central del cauce. Es decir, que el eje central del cauce no se encuentre alineado con el eje central de la estación. Esta situación suele darse en estaciones sobredimensionadas cuyas dimensiones en relación al cauce pueden camuflar esta situación.

Para valorar cuáles son los efectos hidráulicos que envuelven estas situaciones, se ha desarrollado un modelo experimental con el software informático Iber v1.6.

Así mismo, se ha empleado el software de flujo unidimensional HecRas v4.1 de forma complementaria para evaluar las capacidades hidráulicas de las distintas hipótesis modeladas, es decir, el caudal máximo para el que se mantiene la condición de vertido crítico en el vertedero de la V-flat (límite modular), y la capacidad máxima de las distintas hipótesis hasta alcanzar la cota superior de los muros de la estación.

3.1 Condiciones de partida

La situación de partida se concibe asumiendo, a priori, un mal dimensionado y disposición de la estación en relación al cauce, el cual ha sido representado siguiendo las características generales de un cauce real del que se dispone de información foronómica para llevar a cabo el análisis.

La sección transversal del cauce presenta una longitud de 60 m, con una solera de 10 m seguida por un talud de 7,5 m con pendiente del 30%, y un segundo talud de 17,5 m con pendiente del 40%.

La longitud total del canal es de 760 m, 490 m hacia aguas arriba de la estación y 210 m hacia aguas abajo de ésta, siendo los 60 m restantes los correspondientes a la ubicación de la estación.

Las características de la estación corresponden a un diseño estándar, presentando 60 m de ancho con una elevación del vértice de la v respecto de la solera de 0,9 m.

Para la simulación se ha empleado el caudal de $8 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal medio estimado para el cauce de referencia.

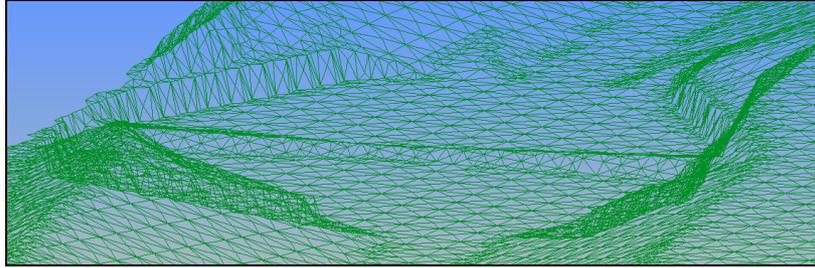


Figura 6 Vista en 3D de la embocadura de la estación en la situación de partida.

3.2 Análisis de la situación inicial

A continuación se presentan una serie de imágenes y gráficos con los resultados de la simulación de la situación inicial para el caudal de análisis. La variable representada es la velocidad, ya que se trata del factor condicionante en los procesos de erosión, transporte y sedimentación.

3.2.1 Resultados de la simulación bidimensional en la situación inicial

Como era de esperar, existe una reducción de velocidades muy significativa en el entorno de la estación con respecto a las existentes aguas arriba de la zona de remanso de la estación.

No obstante, el que exista una reducción de velocidades como consecuencia del remanso que genera la estación es inherente a esta tipología de aforo (efecto azud), en la que se generan condiciones estables de la lámina de agua para su adecuada medición. El problema que se observa se localiza en la propia sección de medida de la estación, donde existe una marcada fluctuación transversal de velocidades como resultado de la existencia de amplias zonas inefectivas.

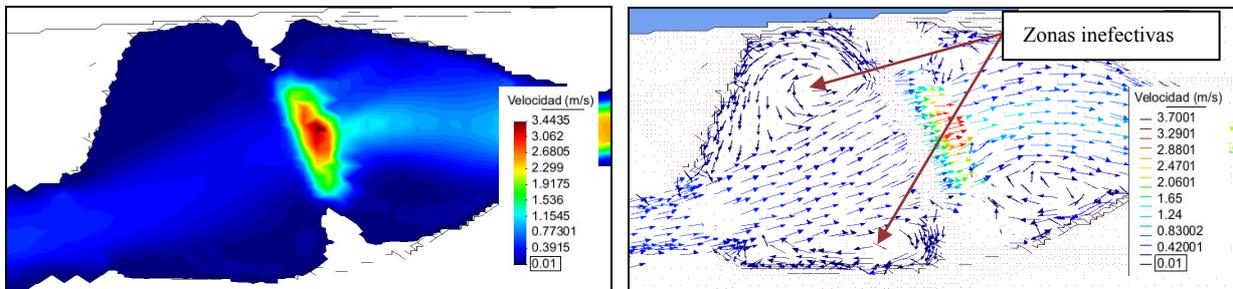


Figura 7 Izquierda: Rango de velocidades en el entorno de la estación. Derecha: Vectores de la velocidad del flujo.

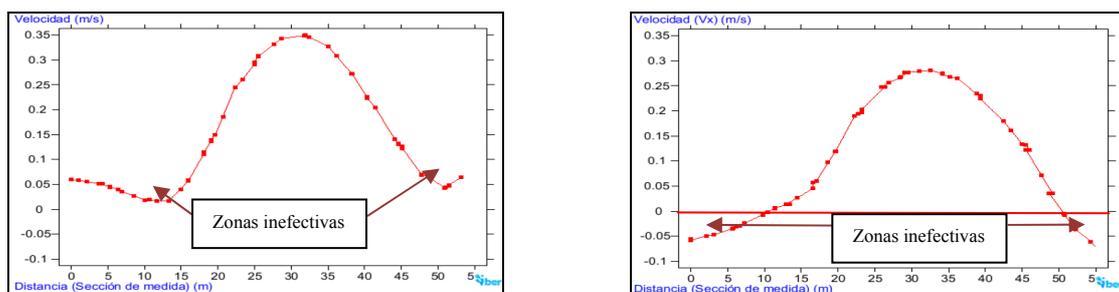


Figura 8 Izquierda: Distribución de velocidades en la sección de medida de la estación (plano perpendicular al flujo). Derecha: Distribución de velocidades en la componente V_x (movimiento de aguas arriba hacia aguas abajo) en la sección de medida.

3.3 Propuesta de alternativas

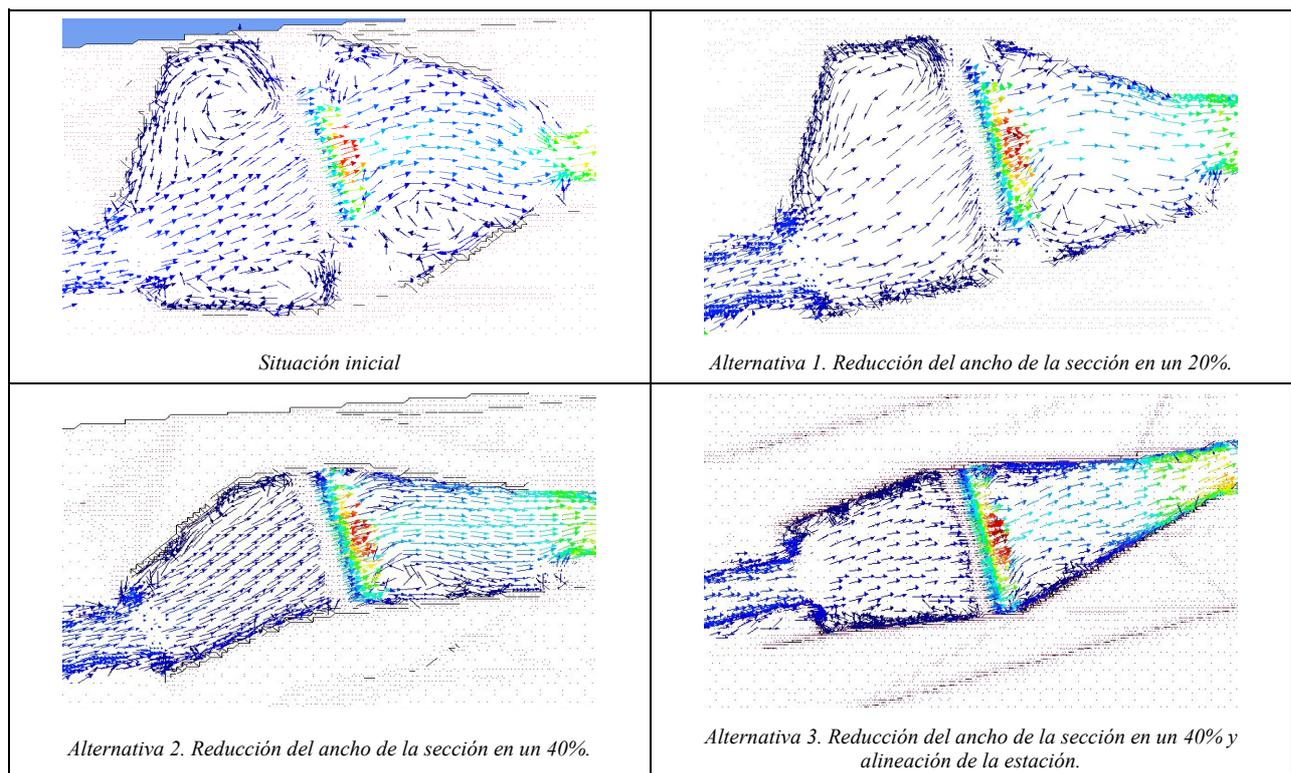
Como se deduce de los resultados anteriores, la solución propuesta pasa por una reducción de la anchura de la estación. A la hora de definir las alternativas se ha tenido en cuenta, de forma general, la complejidad de ejecución material de las mismas, definiendo así dos grupos, ya se trate de una modificación parcial de la estación inicial o una reconstrucción completa de la misma.

- **Alternativa 1.** Reducción del ancho de la estación en un 20%
- **Alternativa 2.** Reducción del ancho de la estación en un 40%
- **Alternativa 3.** Reconstrucción de la estación con una reducción del 40% de la sección actual y alineada con el eje central del cauce.

3.4 Análisis de resultados

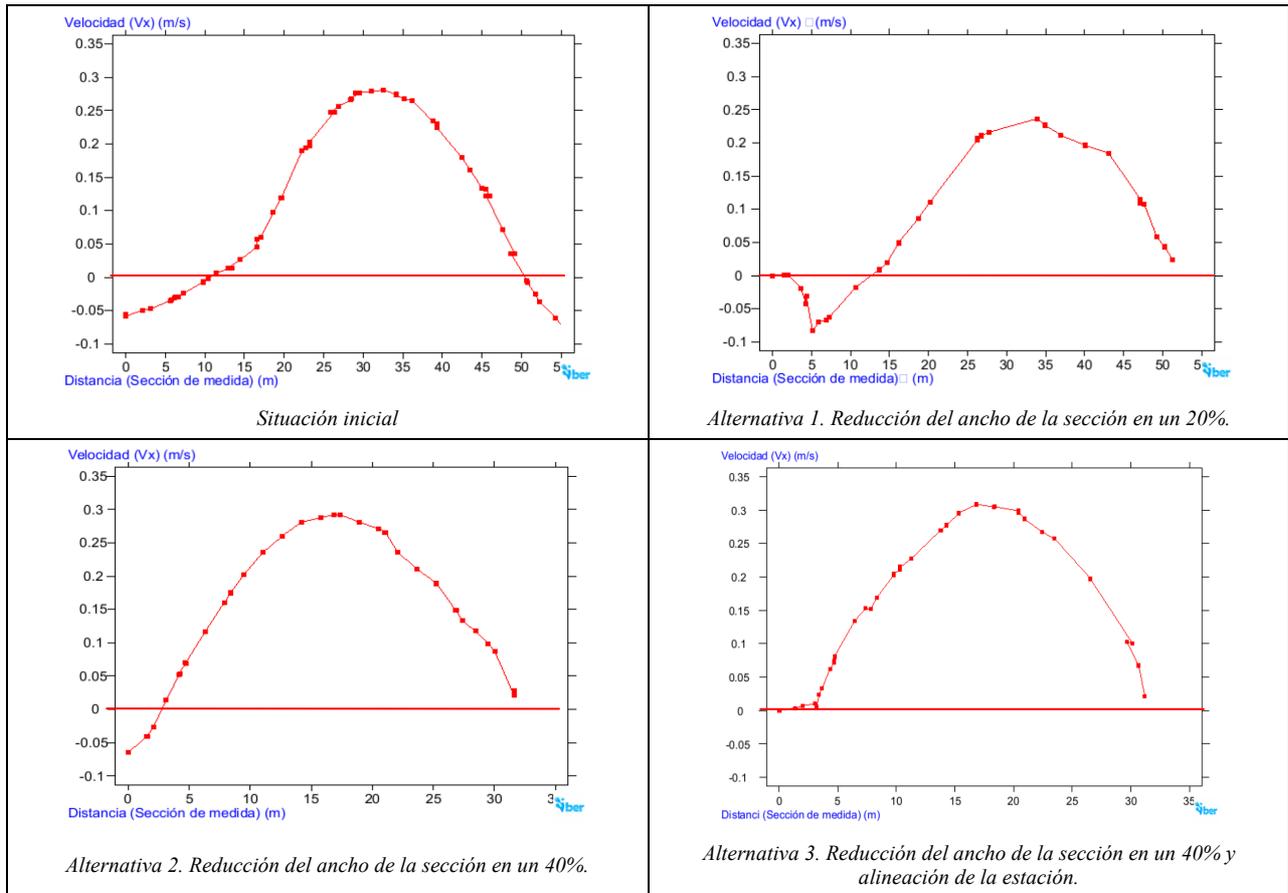
En la representación gráfica de los vectores de la velocidad se aprecia la existencia de zonas inefectivas y cómo, según se reduce el ancho de la sección de la estación en las sucesivas alternativas propuestas, aquéllas se reducen hasta desaparecer.

Tabla 2 Vectores de velocidad del flujo. Resultados comparados.



Como reflejo de la situación mostrada en las imágenes anteriores, se presenta a continuación la distribución de velocidades en un plano perpendicular al flujo (componente V_x) en la sección de medida de la estación, donde destaca la aparición de valores de velocidad negativos como resultado de la inversión del flujo que tiene lugar, con mayor o menor intensidad, en la situación inicial y en las alternativas 1 y 2.

Tabla 3 Distribución de velocidades en la sección de control.



Como se desprende de los resultados, las alternativas 2 y 3 no generan zonas inefectivas importantes, lo que reduciría los posibles problemas de sedimentación. No obstante, en la alternativa 2, al no modificarse la posición de la estación respecto a la línea central de flujo, se crearía una situación de inestabilidad en la lámina de agua como consecuencia del cambio que existe en la dirección del flujo general en la propia estación. Esta situación podría generar un plano inclinado para caudales altos. La alternativa 3 se presentaría como una solución óptima, sin la presencia de zonas inefectivas y con una distribución de velocidades muy regular.

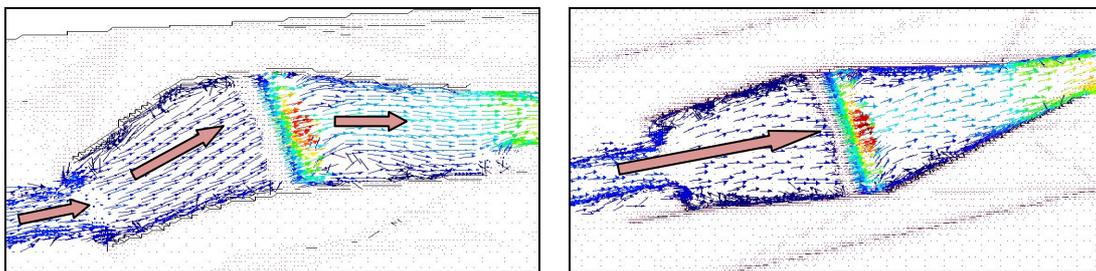


Figura 9 Comparativa de la dirección general de flujo entre las alternativas 2 (izquierda) y 3(derecha).

En líneas generales, con el estrechamiento de la sección se produce una leve disminución de la velocidad con respecto a la situación inicial en el entorno de aguas arriba de la estación. Esta leve reducción se transforma, sin embargo, en un aumento muy significativo de las velocidades en la sección de la estación, donde se alcanzan incrementos de hasta el 85% con respecto a la situación actual, lo que sin duda reduciría drásticamente la deposición de sedimentos.

Por otro lado, se ha evaluado la funcionalidad de cada una de las alternativas consideradas, a través de su capacidad máxima (hasta cota de muros) y límite modular.

Tabla 4 Capacidad hidráulica de cada una de las estaciones modeladas

	Capacidad (m ³ /s)	Límite modular (m ³ /s)
Situación inicial	204	120
Alternativa 1. Reducción del 20% del ancho de la sección	190	138
Alternativa 2. Reducción del 40% del ancho de la sección	152	152
Alternativa 3. Reducción del 40% del ancho de la sección y alineación de la misma.	150	142

Como se desprende de la tabla anterior, con la reducción de la sección se disminuye la capacidad de la estación que, sin embargo, aumenta su límite modular, siendo capaz de medir un rango mayor de caudales con alta fiabilidad.

4 Conclusiones

La experiencia adquirida por el Sistema Automático de Información Hidrológica SAIH del Tajo, ha confirmado la solvencia de las estructuras de aforo de tipología V-Flat como uno de los sistemas de medición con mejores resultados. No obstante, se han identificado diferentes deficiencias relacionadas con su impacto medioambiental y/o funcionamiento hidráulico, derivadas de diseños poco adaptados a las condiciones hidráulicas naturales de los cauces donde se ubican.

El SAIH del Tajo, consciente de la importancia de preservar los ecosistemas ribereños y su fauna asociada, ha incorporado dispositivos de franqueo piscícola en algunas de sus estaciones de aforo V-flat. Como ha quedado patente en este estudio piloto, la modelación hidráulica unidimensional y bidimensional se ha convertido en una herramienta muy práctica en el diseño, evaluación y validación de estos sistemas.

Se ha verificado cómo el diseño de la escala de peces de estanques sucesivos, resuelve los problemas asociados a los aforadores V-flat relacionados con las elevadas velocidades, elevado desnivel y calados excesivamente bajos.

La colocación del sistema de remonte tiene un efecto reductor del límite modular (máximo caudal sin sumergencia del vertedero). Esta reducción se ha estimado en torno al 50%. Por encima de este límite modular pueden aún conseguirse medidas precisas y fiables de caudal, mediante la calibración con aforos directos.

En cuanto a los problemas funcionales de los aforadores V-flat, se concluye que su diseño debe ir estrechamente ligado a las características hidrodinámicas propias de los emplazamientos en los cauces naturales donde se ubican, garantizando así su buen funcionamiento y disminuyendo problemas de mantenimiento.

En general, las alternativas de adecuación posibles para aquellas estaciones existentes que presenten algún tipo de anomalía similar a las tratadas en el presente estudio, pasan por alguna de las siguientes soluciones:

- Reducción del ancho de la sección aprovechando la estructura actual; en aquellos casos en los que el eje de la estructura se encuentre alineado con el eje central de flujo en el cauce natural.
- Reconstrucción de la estación adaptando su sección a las dimensiones del cauce y alineando la estación respecto a la línea de flujo.
- Reconstrucción de la estación cambiando a una tipología de estación clásica como es la de sección rectangular (para los casos extremos en los que el entorno no se adecúe en absoluto a una estación V-Flat).

Cabe indicar en último término que, contrariamente a lo que pudiera parecer, la reducción de la sección no lleva aparejada una reducción en el límite modular de la estación, como ha quedado demostrado en los resultados de la simulación.

5 Referencias bibliográficas

Sanz Ronda, F.J., Bravo Córdoba, F.J., Martínez de Azagra, A. “Estaciones de aforo V-flat y peces migradores de la Península Ibérica: problemas y soluciones.” Artículo para Ingeniería Civil 158/2010 (CEDEX).

Hinojal Martín, J.A. 2011. “Proyecto de ampliación de trece nuevos puntos de control de la red del Sistema Automático de Control Hidrológico SAIH del Tajo”. SAIH del Tajo. Confederación Hidrográfica del Tajo.

Confederación Hidrográfica del Tajo. 2002. “Informe de predimensionado de la escala de peces en el aforo AR-40”.

Iber. 2010. “Manual de referencia hidráulico Iber VI.2”. Iberaula.CEDEX, Grupo de ingeniería del agua y del medio ambiente, Flumen, CIMNE9.

Iber. 2011. “Manual básico de usuario” Iber V3”. Iberaula.CEDEX, Grupo de ingeniería del agua y del medio ambiente, Flumen, CIMNE9.

Hydrologic Engineering Center (2010) HEC-RAS River Analysis System. “Hydraulic Reference Manual”. Versión 4.1.CPD-69.U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California (U.S.A.)

Hydrologic Engineering Center (2010) HEC-RAS River Analysis System. “User’s Manual”. Versión 4.1.CPD-69.U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California (U.S.A.)