

04-014

**ANALYSIS OF THE RESTORATION OF A FLUVIAL ENVIRONMENT:
RECONSTRUCTION OF DE LA MARQUESA WEIR (CULLERA)**

Cabañero Fernández, Javier (1); Martín Utrillas, Manuel Guzmán (1); Curiel Esparza, Jorge (1); Cantó Perelló, Julián (1)

(1) Universitat Politècnica de València

The Marquesa weir, Cullera (Valencia), is a hydraulic infrastructure that has protected against the marine intrusion of the Mediterranean Sea in the Júcar River for more than 400 years. This weir has generated a complex ecosystem and is a regulator of irrigation intakes. The research will show the reconstruction without altering the exploitation and mixing waters of different salinities. The restoration of the riverside vegetation and the fixing of the river banks needed a breakwater. The new hydraulic profile of the weir, built-in reinforced concrete, and metal fibers, was designed to increase its hydraulic capacity and, in turn, to be able to restore the water to the channel minimizing erosion. The execution used the old dam as a work platform to make cofferdam. Screens of cement bentonite were built to waterproof the riverbed.

Keywords: Fluvial restoration; Weir reconstruction; Cofferdam

**ANÁLISIS DE LA RESTAURACIÓN DE UN ENTORNO FLUVIAL: RECONSTRUCCIÓN
DEL AZUD DE LA MARQUESA (CULLERA)**

El Azud de la Marquesa, Cullera (Valencia) es una infraestructura hidráulica, que protege contra la intrusión marina del mar Mediterráneo en el río Júcar desde hace más de 400 años, lo que ha generado un ecosistema complejo, además de ser un regulador de importantes tomas de riego. Se analiza la reconstrucción de la presa sin alterar la explotación del río y sin mezclar aguas de diferentes salinidades, así como la restauración de la vegetación de ribera y la fijación de las riberas del río mediante una escollera. El nuevo perfil hidráulico de la presa, construido en hormigón armado y fibras metálicas, está diseñado para aumentar su capacidad hidráulica y a su vez poder restaurar el agua al canal minimizando la erosión. La ejecución utiliza el viejo azud como plataforma de trabajo para ejecutar recintos estancos. Para impermeabilizar el lecho del río, se construyen pantallas de bentonita de cemento.

Palabras clave: Restauración fluvial; Reconstrucción azud; Recintos estancos



1. Introducción

El azud de la Marquesa, Cullera (Valencia), se ha utilizado para derivar aguas, del río Júcar, para riego y para abastecer un molino arrocero. Su existencia se menciona en el testamento de Lluís de Vich, barón de Llaurí, Beniomer, Beniboquer i Matada en el año 1584 (Archivo Diputación de Valencia). Aguas arriba del azud se genera un ecosistema de agua dulce y aguas abajo de agua salada. El azud está situado a 4,5 km de la desembocadura del río Júcar donde el mar Mediterráneo remonta a modo de estuario. Los estuarios de la costa mediterránea son vulnerables frente a cambios ambientales presentando aumento de intrusión salina (Serrano et al, 2020). Aguas arriba del Azud de la Marquesa existen tomas de riego además de la toma del Tránsito Júcar-Vinalopó (Pérez Sánchez et al, 2017). La comunidad de regantes de Cullera utiliza el embalse generado por el azud de la Marquesa para regar 3.429 ha con una dotación media de 6.091 m³/ha. año (Plan Hidrológico de la Confederación del Júcar, 2021). Debido al mal estado de conservación del azud es necesario su reconstrucción sin afección al régimen de explotación del río normal. El nuevo perfil hidráulico consigue un aumento de capacidad de desagüe del río, así como la restitución al cauce sin causar erosiones (USBR, 1987).

La ejecución de infraestructuras dentro del río requiere estructuras temporales que permitan su ejecución en seco y que aguanten los sobrevertidos ante crecidas del río, son las ataguías o en inglés cofferdams (Developments in Geotechnical Engineering, 1979).

Para evitar la intrusión salina se realizan presas subterráneas (Chang et al, 2019) lo que se materializa con la realización de pantallas impermeables subterráneas de bentonita cemento.

Este trabajo desarrolla los procesos para conseguir la reconstrucción del azud de la Marquesa considerando todos los condicionantes de contorno derivados de la previa existencia de la estructura y sin afectar al entorno de explotación normal del río y al medioambiente.

2. Objetivos

Hay que realizar la reconstrucción del azud de la Marquesa cumpliendo las funciones actuales y, mejorando su capacidad de desagüe con un nuevo perfil hidráulico que cuente con mayor capacidad de desagüe. Además, de la restauración del entorno natural del río y conseguir la permeabilidad a la ictiofauna mediante una escala de peces.

No hay que olvidar que el azud de la Marquesa es el primer obstáculo frente a la intrusión marina provocada por el mar Mediterráneo en su ascenso por el río Júcar. La economía local se dedica mayormente a la agricultura del naranjo y el arroz. Sin el azud de la Marquesa se podría cambiar la economía local de la zona y afectar a la flora y fauna por la gravedad de los efectos irreversibles que su desaparición supondría.

3. Caso de estudio

La actuación consiste en reconstruir el azud con hormigón armado y una nueva sección hidráulica del Bureau of Reclamation (USBR, 1987). Se utilizará el antiguo azud como plataforma de trabajo con motivo de realizar recintos estancos con tablaestacas, cofferdams, a modo de ataguías y contraataguías. Se realizará la demolición del azud antiguo utilizando esta ubicación como zona de trabajo de las pantalladoras de bentonita cemento. Así se continuará realizando el hormigonado con fibras metálicas. Finalmente se extraerán las tablestacas poniendo en servicio la nueva infraestructura.

La infraestructura existente genera los siguientes condicionantes derivados de su implantación en el territorio:

- Imposibilidad de mezcla de aguas dulces y saladas durante la ejecución.
- La cota del azud, 1,75 m.s.n.m., y la longitud del mismo 214 metros.
- No afección a la avifauna por ruidos producidos por la ejecución de la obra durante la época de nidificación entre abril y agosto.
- Recomendación por avenidas de no ejecutar obras dentro del azud entre los meses de septiembre a noviembre.
- Respetar la cimentación por pilotes existente.
- Ejecución del tajo de plantaciones entre octubre y febrero.

El proyecto contemplaba un único recinto estanco, cofferdam, y ejecución de un canal de desvío para la ejecución del azud, que finalmente sería una escala de peces.

No se puede generar turbidez en las aguas que puedan afectar a la ictiofauna derivados de generación de ataguías y contraataguías en el lecho del cauce del río Júcar aguas arriba y aguas abajo que no sean las propias del tajo de canal de desvío.

3.1 Recintos estancos

Originalmente se contemplaba la ejecución de un único recinto de tablestacas y la ejecución de un canal de desvío de 30 m³/s. Se estudia la posibilidad de ejecución en dos recintos estancos independientes. Este proceso constructivo conlleva dos mejoras francas, poder derivar el río por la parte del azud que no se esté trabajando y la medición de tablestacas disminuye a la mitad.

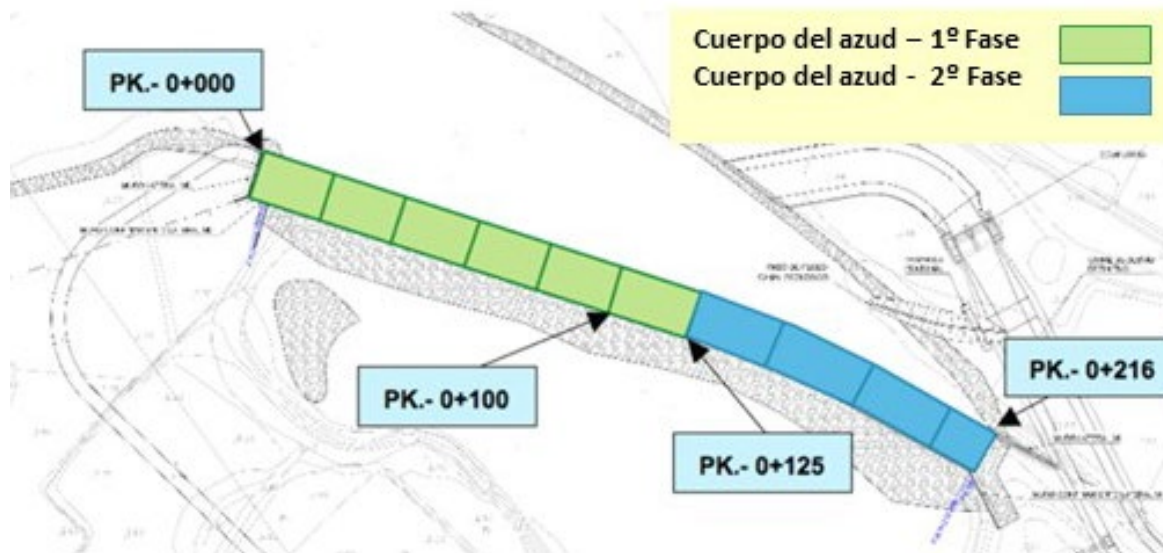


Figura 1 Disposición en planta de las dos fases de tablestacas

Con estas medidas se mejora notablemente las previsiones de proyecto, ya que existirá menor afección por crecidas al encontrarse el 50 % del azud libre para el paso de caudales, permite calcular la nueva altura de tablestacas y disminuir la sección del canal de desvío, como consecuencia se maximiza número de días que se puede trabajar en el azud.

3.2 Historio hidráulico tablestacas

El proyecto considera la restauración del azud en una fase. No obstante, consideramos que la ejecución en dos fases aporta ventajas tanto hidráulicas como técnicas a la obra.

Durante la primera fase, se empezará tablestacando desde el pk 0+100 al PK 0+216, considerándose en los cálculos una longitud de 100m de azud con un funcionamiento en estado actual y 116 m de tablestacado (se considera un vertedero de labio fino); en esta fase se restauran un total de 91 m de azud.

El proyecto cuenta con una ataguía de tablestacas a la cota +1,97 m.s.n.m. y un canal de desvío de 30 m³/s, lo que corresponde a un período de retorno de 0,7 años. A partir de ese caudal, empezaría a inundarse el recinto de obra lo que supondría graves perjuicios para la ejecución.

En caso de la ejecución en dos fases y siempre manteniendo la capacidad estricta del azud, 220 m³/s, en la primera subfase existiría un paso de agua de 100m, por la parte del azud de la margen derecha, y en margen izquierda estaría el recinto de tablestacas con una longitud de 116 m de azud y a la cota +2,04 m.s.n.m. De esta manera el caudal a desaguar sería: 30 m³/s (canal de desvío) +21,92 m³/s (azud margen derecha) =51,92 m³/s lo cual, está asociado a un período de retorno de 1,1 años.

En la segunda subfase la parte habilitada de azud son 91 m y la tablestaca en margen izquierda 125 m, a la cota +2,40 m.s.n.m. Al estar operativo, en la margen izquierda, el nuevo USBR se amplía la capacidad de descarga: 30 m³/s (canal de desvío) +90,30 m³/s (azud margen izquierda) =120,30 m³/s lo cual está asociado a un período de retorno de 3,3 años.

Es decir, el proyecto original tiene inundación a partir de la lluvia asociada un período de retorno a 0,7 años. En el proceso de dos fases se incrementa la probabilidad a 1,1 años en la primera fase y a 3,3 años en la segunda fase por lo cual se le demuestra a la administración que con este proceso constructivo se disminuye la probabilidad de inundación en obra por lo que existe una mayor garantía de construir el azud.

Habría que recordar que el período de retorno asociado a 220 m³/s es de 5 años. Las obras en el lecho del cauce se estiman en 9 meses.

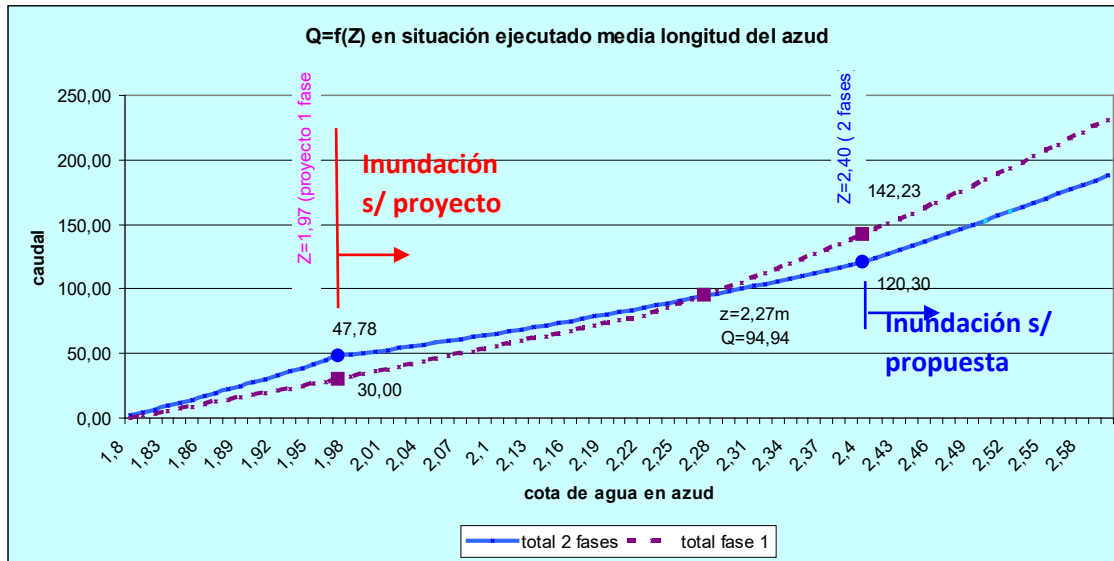


Figura 2 Caudales según hipótesis de 1 fase (un recinto) y dos fases (dos recintos)

3.3 Ejecución pantallas bentonita cemento

La sección tipo del azud de la Marquesa contempla la ejecución de sendas pantallas de bentonita-cemento de diferentes longitudes. El cimiento del azud, de arriba abajo, se compone por un estrato de arenas de unos 5 metros de potencia de permeabilidad $K=0,1$ cm/s, posteriormente otros 5 metros de arcilla limosa, $K=1,4 \cdot 10^{-7}$ cm/s y finalmente un estrato de limos arcillosos $K=1,5 \cdot 10^{-7}$ cm/s. El estrato inferior posee una capacidad portante de 2,5 kg/cm². La función de la pantalla situada aguas arriba es generar una barrera frente a la intrusión marina, dicha pantalla tiene una longitud aproximada de 12 metros y se empotra en el estrato de limos arcillosos. La pantalla situada aguas abajo de la sección del azud tiene una profundidad de unos 6 metros y una longitud en planta 215 metros (la longitud del azud) y se concibe para evitar la erosión remontante producida en el lecho del río que pudiese descalzar el azud.

En el proyecto se definía el recinto de tablestacas el cual se suponía estanco grafiándose la cota de los muros guía de la pantalla de bentonita-cemento a -1,12 m.s.n.m. Pero una vez construido el recinto de tablestacas resulto no estanco. Es por ello, que se tuvo que coronar los muros guía a 1,5 m del nivel estático.

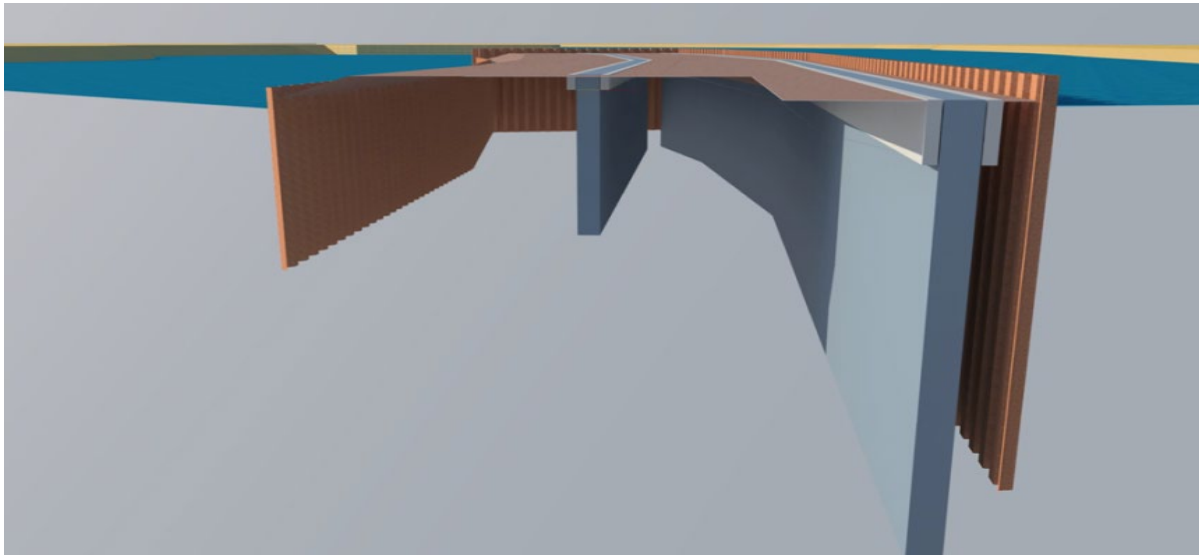


Figura 3 Simulación 3D (SketchUP) de cofferdam y sendas pantallas bentonita cemento

Este nivel estático venía determinado por el nivel mar, por lo que se coronaron los muretes guía sensiblemente a la cota del azud, la 1.75 m.s.n.m.

La ejecución de la pantalla se realizaba por bataches alternos. Se situó una planta de cemento bentonita en obra tomando agua del río Júcar. Para la puesta en obra de la mezcla plástica se diseñó un sistema de pontones flotantes sobre el río mediante garrafas y palets, las cuales se atirantaban a tierra mediante tensores de acero metálico.

3.3 ejecución azud

La excavación se realizó hasta la cota -1 m.s.n.m. por condicionantes arqueológicos puesto que se quería conservar los cimientos del azud antiguos. Dicho azud funcionaba como una viga flotante cimentada sobre los pilotes que soportaban las cargas por fuste.

En cuanto a la cimentación de la nueva estructura esta cimentada sobre el anterior del azud, que supone un grado de consolidación, por lo que, atendiendo a un posible asiento diferencial y/o socavación posible, se arma para soportar tracciones. Se debe comentar, que cuando se comenzó la obra, el azud primitivo mostraba signos de asientos diferenciales.

La secuencia de construcción se definió por bloques alternos, pero cada bloque a su vez se materializó en dos fases.

La curva de radio 1,5 metros que se define como parte final del trampolín de lanzamiento del perfil se realizó maestreado a mano. Se construyeron maestras con la curvatura exacta a los planos de construcción, las cuales, se independizaron de la ferralla colocada para evitar alteraciones en la cota.

Estas maestras se recuperaban de un bloque a otro asegurando así la perfecta repetición del trampolín de lanzamiento. La superficie de la primera fase del azud se maestreaba y la segunda fase se realizaba mediante un encofrado donde fue definida la curva con discretización milimétrica para realizar una curva continua de la superficie parabólica del Creager.

El azud se va a reconstruir con hormigón con fibras de acero HAF-35/A-CR/P/20-60/IIIc+Qc, el cual indica que el hormigón tendrá una resistencia a flexión mínima de 35MPa, con fibras de acero (A), hormigón no estructural con fibras para control de la retracción (CR), consistencia plástica (P), tamaño máximo del árido 20mm, longitud de la fibra de 60mm para ambientes IIIc+Qc (ambiente agresivo por sulfatos).

El proyecto considera el azud como una estructura que resiste por peso cimentado en un medio elástico, la del antiguo azud, y en sus hipótesis de cálculo considera el azud futuro se descalza y se comporta como una ménsula apoyada aguas arriba. Es por ello, dimensiona el azud como una viga armándola en las dos direcciones y le adiciona fibras metálicas para evitar la erosión del azud por el paso del agua. Al estar en contacto con agua de mar se utiliza cemento sulfuresistente.

Al ser hormigón de la normativa EHE (2008) se cumple un mínimo de cantidad de cemento por unidad de hormigón. Esa cantidad son 400 kg/m³. Esta cantidad es un valor anormal para este tipo de estructuras, lo que genera altas resistencias.

Así mismo, al llevar cemento sulfuresistente, aguas abajo del azud está el mar Mediterráneo, el porcentaje en clinker es menor que la adición de escoria de altos hornos, lo que provoca que este conglomerante de endurecimiento más tardío que el clinker genere aumentos de resistencia a edad mayor de 28 días.

La ejecución del hormigón con fibras es vital que la dispersión de las fibras de acero sea uniforme con el fin de evitar riesgo de segregación y de formación de bolas de fibras, hecho que aun tomando precauciones ocurre, el cometido de una buena puesta en obra es la disminución de estos elementos. La uniformidad en la dispersión depende principalmente del porcentaje de fibras, la esbeltez, la relación agua/cemento y el sistema de mezclado. Elementos que se definirán en los ensayos previos para la dosificación del proyecto.

Se comienza por la zona más alejada del estribo ya que se simultaneaban tajos y la excavación y posterior vertido del hormigón de limpieza se realizaba en retirada hacia el estribo. De esta manera se podían ganar días a la ejecución y no convertir el tajo en un camino crítico.

Sólo se detallará la ejecución de la primera fase del azud (recinto de tablestacas en la margen izquierda) por brevedad en el documento ya que la segunda fase se construirá de forma análoga a la primera.

El bloque de azud, de aproximadamente 20 metros de longitud, se ejecuta en dos fases, en alzado, diferenciadas por la zona de perfil a ejecutar. Una primera donde se materializa el trampolín de lanzamiento, la parte cóncava del perfil, y una segunda donde se ejecuta el perfil Creager.

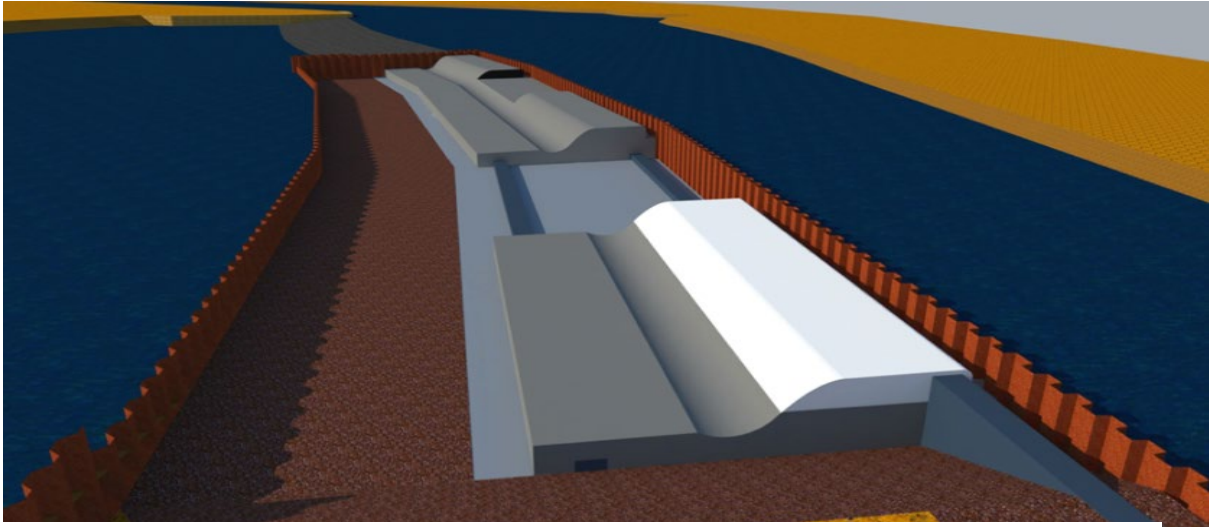


Figura 4 : Ejecución azud por bloques alternos y en diferentes fases

Una vez finalizado el hormigonado con hormigón armado y con adición de fibras se realiza la colocación de escollera hormigonada aguas abajo del mismo para evitar erosiones en el pie aguas abajo, realizándose una transición desde una estructura rígida como es el azud, a una semirrígida (escollera hormigonada) y finalizando en escollera sin hormigonar en contacto con el lecho del río.

Para la ejecución de la escollera colocada y hormigonada, se debe realizar previamente el vaciado de la plataforma de trabajo para ejecución del azud construido, sobre el antiguo azud, aguas abajo del mismo. Seguidamente, se procedió a la retirada del recinto de tablestacas trasladándolas a la segunda fase con motivo de su hincada para la realización del recinto estanco. Con esta retirada se pone la primera fase en servicio y se comienza a realizar la siguiente fase.

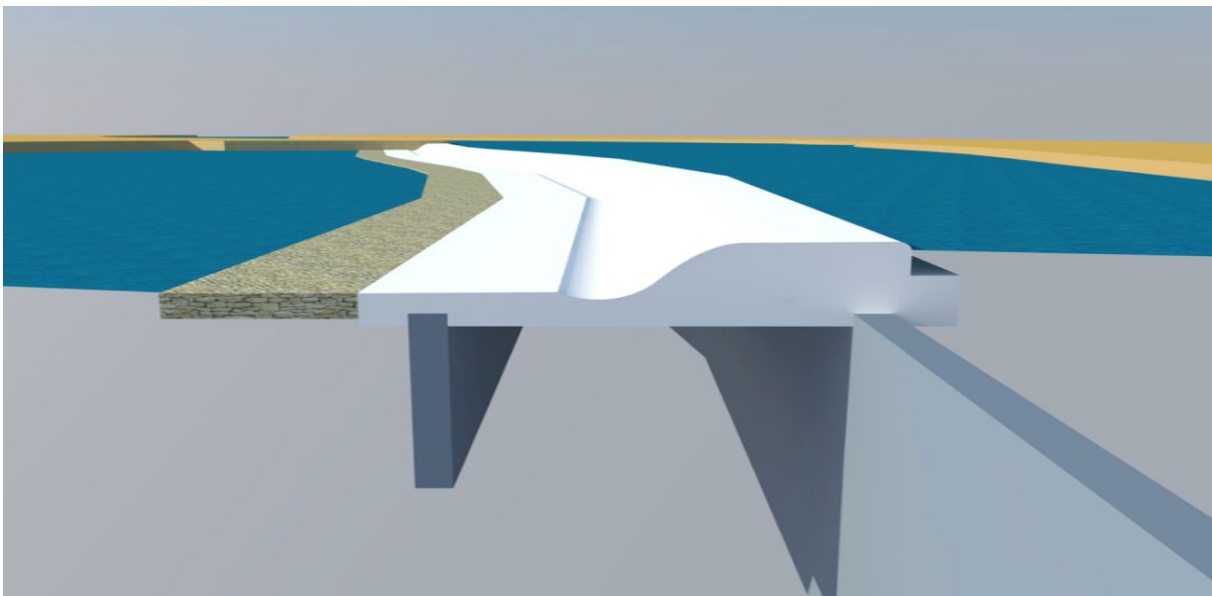


Figura 5 Vista definitiva reconstrucción azud de la Marquesa con pantallas bentonita cemento y escollera

El entorno del azud de la Marquesa se encuentra incluido dentro del espacio natural catalogado como Lugar de Importancia Comunitaria (LIC) "Riu Xúquer". (2012) Se trata de

una figura de protección que forma parte de la Red Natura 2000, red ecológica europea compuesta por los lugares que albergan tipos de hábitats naturales de interés comunitario.

Este LIC fluvial, con una superficie total de 370 hectáreas, comprende el tramo del río Xúquer, entre la presa de Tous y su desembocadura. Además, el azud de la Marquesa se incluye en el interior de la zona húmeda catalogada “Desembocadura y Frente Litoral del Xúquer”, debido a sus valores bióticos de los ambientes fluviales y litorales asociados.

Las actuaciones se han centrado primordialmente en la eliminación de especies invasoras como la caña, el tendido de taludes de las orillas, la plantación de especies autóctonas tanto arbustivas como arbóreas y la restitución de la continuidad longitudinal del río desde el punto del tránsito de la fauna piscícola.

Dada la infranqueabilidad actual del azud se ha procedido a su adecuación para permitir el tránsito de peces.

Las especies piscícolas autóctonas presentes en el tramo de río estudiado son:

Anguila (*Anguilla anguilla*) y Barbo (*Barbus guiranois*)



Figura 6 Vista de las plantaciones y escollera realizadas

Dada la infranqueabilidad actual del azud se ha procedido a su adecuación para permitir el tránsito de peces.

Las especies piscícolas autóctonas presentes en el tramo de río estudiado son:

Anguila (*Anguilla anguilla*) y Barbo (*Barbus guiranois*)



Figura 7 Vista de la escalera de peces realizada escollera

Tras la eliminación de cañas en las orillas del cauce, se ha procedido al tendido de los taludes con la menor pendiente posible y la fijación de ribera con escollera. En el resto del área de actuación se ha procedido a la renaturalización de la morfología de las riberas creando unas áreas con mayor cota que la actual y otras con menor, consiguiendo así la ondulación del terreno y la aproximación de las segundas al freático para favorecer el desarrollo de especies propias del entorno.

En las riberas y orillas del Júcar y en el entorno de las sendas se han empleado especies autóctonas, que actualmente o potencialmente pueden estar presentes en el río. Estas especies vegetales introducidas están representadas por la geoserie fluvial valenciana de los bosques de álamos blancos (*Vinca difformis*-*Populus alba* *geosigmetum*).

La secuencia de plantaciones ha sido:

Orillas del cauce: *Iris pseudacoris*, *Scirpus holoschoenus*, *Sparganium erectum*, *Scirpus tanernaemontani*, *Juncus subnodulosus*, *Cladium mariscus*, *Carex elata*, *Scutellaria*

galericulata y *Lonicera biflora*.

Primera banda de ribera: Arbustivas: sarga (*Salix eleagnos*), sauce negro (*Salix trocinerea*), mimbrera (*Salix purpurea*), adelfa (*Nerium oleander*), y taray (*Tamarix gallica*). Arbóreas: sauce blanco (*Salix alba*) y álamo (*Populus alba*),

Segunda banda de ribera: Arbustivas: adelfa (*Nerium oleander*), taray (*Tamarix gallica*), majuelo (*Crataegus monogyna*), mirto (*Myrtus communis*) y durillo (*Viburnum tinus*), estos dos últimos en las zonas más altas y alejadas del cauce. Arbóreas: álamo (*Populus alba*), fresno (*Fraxinus angustifolia*) y fresno de flor (*Fraxinus ornus*) y almez (*Celtis australis*)

Márgenes de sendas: En los márgenes de las sendas proyectadas se han plantado ejemplares de 14-16 cm de calibre de álamo (*Populus alba*) y almez (*Celtis australis*) de mayor porte, distribuidos al tresbolillo.

4. Resultados

Las definiciones del azud construidas son: Longitud 214 m.

Ejecución de azud con diseño del USBR y cuenco de amortiguación, realizado en hormigón con fibras de acero. Perfil de vertido con ecuación $y=0.441 x^{1.84}$ y cuenco semicircular para la disipación de energía. Aguas arriba del perfil creager una plataforma de 3,06 m de ancho para facilitar el mantenimiento del azud. La pantalla de bentonita cemento de aguas arriba empotrada hasta la cota -12 con prolongación lateral en sendas márgenes. La pantalla de aguas abajo empotrada hasta la -6 m.

Colocación de escollera aguas abajo del azud para permitir una transmisión de tensiones uniformes. Protección medioambiental de márgenes aguas arriba y aguas abajo del azud en ambas márgenes con escollera en 860 m. Canal ecológico para peces con sección trapezoidal y revestimiento con escollera en taludes y lecho.

Implementación de la renaturalización y recuperación de la morfología del terreno y de las riberas del río eliminando especies invasoras (caña común, plumero y ricino).



Figura 8 Vista definitiva reconstrucción azud de la Marquesa.

5. Conclusiones

Las conclusiones generales del trabajo son:

La elección de sendos recintos estancos para la ejecución de obra favorece claramente a la obra, ya que reduce el tiempo de estancia en el lecho del río, aumentando el caudal por el cual se inundaría la misma.

Al aumentar el caudal de paso del río Júcar sin que ocurra inundación, respecto al proyecto, se disminuye el riesgo de que sobrevenga una crecida que inunde el recinto de trabajo.

La solución en dos recintos es la más robusta frente a crecidas en un río con régimen tan torrencial como es el Júcar. La solución en dos fases no es viable sin el diseño de corte de aguas previsto. Con el corte transversal se cumplen los invariantes de la obra, no variar la cota del río y asegurar que no se mezclen agua dulce (aguas arriba) con agua salada (aguas abajo).

La elección de fases de hormigonado en función del perfil tipo del azud y del encofrado fabricado exprofeso para la obra, ha sido crucial para lograr alta calidad en acabados con unos altos rendimientos de trabajo. La secuencia de ejecución de bloques alternos prevista ha permitido concatenar distintos tajos sin discriminación de actividades básicas.

Restauración del medioambiente degradado con vegetación autóctona y fijación de riberas del río frente a avenidas.

6 referencias

Archivo Diputación de Valencia. Dibujos 1-8 del apartado 8.1, E.3.1, Caixa 251, expediente 5.634.

Chang, Q., Zheng, T., Zheng, X., Zhang, B., Sun, Q., & Whalther, M. (2019). Effect of subsurface dams on saltwater intrusion and fresh groundwater Discharge. *Journal of Hydrology*. 576, 508–519. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.060>

Confederación hidrográfica del Júcar (2021). Plan Hidrológico de la demarcación del Júcar. Memoria-anejo 3. Usos y demandas del agua. Ciclo de planificación hidrológica 2022-2027.

Developments in Geotechnical Engineering (1979). Cofferdams chapter 13. *Elsevier*. Volumen 24, pages 262-229. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-99789-0.50019-4>.

ESPAÑA. Ministerio de Fomento. Instrucción de hormigón Estructural, EHE-08 (2010). Disponible en: https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/1820100.pdf

ESPAÑA. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, LIC Riu Xúquer (2000). ES5232007. Disponible en: <https://natura2000.eea.europa.eu/Natura2000/SDF.aspx?site=ES5232007>

Google SketchUp. Publicado en: <https://www.sketchup.com/es>

Pérez-Sánchez, M., Sánchez-Romero, F.J., & López-Jiménez P.A. (2017). Nexo agua-energía: optimización energética en sistemas de distribución. Aplicación “postrasvase Júcar-Vinalopó”, España. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VIII, núm. 4, julio-agosto de 2017, pp. 19-36. DOI: 10.24850/j-tyca-2017-04-02

Serrano, M.A., Cobos, M., Magaña, P.J., & Díez-Minguito, M. (2020). Sensitivity of Iberian estuaries to changes in sea water temperature, salinity, river flow, mean sea level, and tidal amplitudes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 236, 106624. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106624>

U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation USBR (1987). Design of small dams.

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

