

Optimización de técnicas de bioingeniería para la mejora del estado ecológico y estabilización de márgenes de los ríos de ámbito mediterráneo

Miguel Hernanz Sánchez⁽¹⁾, Marta González Sánchez⁽¹⁾, José Manuel García-Guijas Redondo⁽¹⁾, Alfonso Saiz de la Hoya Zamacola⁽¹⁾, Francisco Javier Sánchez Martínez⁽²⁾, Mónica Aparicio Martín⁽²⁾

(1) Dirección Técnica de Tragsa

(2) Subdirección de Gestión Integrada del Dominio Público Hidráulico. Dirección General del Agua. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

jgarcia5@tragsa.es

La bioingeniería es una disciplina constructiva que utiliza materiales de origen vegetal solos o mezclados con materiales inertes y/o biodegradables en la estabilización de taludes aprovechando su bajo coste y bajo impacto ambiental.

Este proyecto se viene desarrollando desde 2009, cuando la Dirección General del Agua (MAGRAMA) encomendó a Tragsa su ejecución y seguimiento.

El objetivo principal ha sido determinar la eficacia de las técnicas de bioingeniería en la estabilización de márgenes de ríos de ámbito mediterráneo. Hasta ese momento, en España eran escasos los proyectos en esta línea mientras que se tiene constancia de su efectividad en países de Centro Europa.

Así mismo permite valorar su contribución en la mejora del estado ecológico de los diferentes cursos fluviales tal y como exige la Directiva Marco del Agua.

Se han ejecutado diversas técnicas en escenarios de siete Confederaciones Hidrográficas (Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana, Segura, Júcar y Ebro), de manera que los resultados ayuden a definir la idoneidad de las técnicas para distintos condicionantes y objetivos. Las técnicas ensayadas han sido muy variadas y cabe destacar la construcción de fajas, instalación de geomallas y mantas orgánicas, construcción de muros Krainer, entramados vivos, instalación de rollos estructurados, etc.

1. INTRODUCCIÓN

Se tiene constancia de la efectividad de la bioingeniería en obras de estabilización en el ámbito fluvial en países de Centro Europa. Hasta hace unos años, en España eran escasos los proyectos en los que se empleaba, por este motivo la Dirección General del Agua (MAGRAMA) ha impulsado el proyecto de I+D+i de optimización de técnicas de bioingeniería enmarcado en la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos.

Para el ensayo de las diferentes técnicas de bioingeniería se han seleccionado quince tramos de cursos fluviales de siete Confederaciones Hidrográficas con problemas de erosión pero cuyas causas, y condiciones climáticas e hidrológicas, son muy diferentes.

La distribución de las actuaciones se observa en la figura 1.



Figura 1. Mapa de distribución de actuaciones

				Técnicas ensayadas								
CH	Provincia	Términos municipales	Cauce	Plantación	Estaquillado	Fajina	Red o manta orgánica	Muro Krainer	Empalizada de troncos	Gavión	Biorrollo	Tocones, troncos, etc.
Miño-Sil	Pontevedra	O'Rosal y Oia	Río Tamuxe									
	León	Cacabelos	Arroyo Vega del Rey									
		Torre del Bierzo	Río Boeza									
Duero	Ávila	La Hija de Dios	Arroyo La Hija de Dios									
Tajo	Guadalajara	Riba de Saelices	Río Linares									
	Cáceres	Fresnedoso de Ibor y Castañar de Ibor	Río Ibor									
	Ávila	Candeleda	Garganta de Chilla									
Guadiana	Ciudad Real	Fernán Caballero	Río Bañuelos									
		Porzuna	Arroyo Piedra Lá									
Segura	Murcia	Cieza	Río Segura									
Júcar	Teruel	Libros	Río Turia									
		Villastar	Río Turia									
Ebro	Zaragoza	Monterde y Cimballa	Río Piedra									
		Sabiñán	Río Jalón									
	Huesca	Fiscal	Río Ara									

Tabla 1. Distribución de actuaciones y técnicas ensayadas

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del proyecto ha sido evaluar la eficacia de las diferentes técnicas de bioingeniería para la estabilización de márgenes de cursos fluviales de la Región Mediterránea determinando si las especies vegetales utilizadas permiten la adaptación a épocas de estiaje y a las perturbaciones derivadas de los agentes climáticos que se dan en estos cauces.

Otros objetivos perseguidos han sido profundizar en los criterios de diseño a la hora de seleccionar la técnica más adecuada para cada problemática y ámbito geográfico, establecer indicadores de seguimiento eficaces y objetivamente verificables para evaluar el grado de viabilidad de las técnicas y una vez finalizado el seguimiento, divulgar los resultados y conclusiones que establecerán posibilidades de aplicación a nivel regional o nacional.

3. METODOLOGÍA

El estudio se ha realizado considerando dos aspectos: la resistencia estructural que cada técnica confiere estabilidad al talud, desde su ejecución hasta la degradación de los materiales que se han empleado, y el desarrollo de la vegetación que supone la recuperación de la vegetación de ribera y la creación de nuevos hábitats.

En el seguimiento de las actuaciones se han diferenciado dos partes, la toma de datos en campo y el trabajo de gabinete.

En campo, se ha evaluado la evolución del estado ecológico de los tramos fluviales mediante el uso de diversos índices y se ha observado el desarrollo de la vegetación y los daños presentes en las estructuras ejecutadas.

El trabajo de gabinete ha consistido principalmente en la recopilación de datos de avenidas y de caudales medios diarios, elaboración de modelos hidráulicos que muestran velocidades, caudales y las máximas tensiones soportadas por las técnicas, y modelos geotécnicos que permiten dimensionar correctamente la técnica de bioingeniería indicada para cada talud.

4. RESULTADOS

Desde el inicio de los trabajos en 2009 hasta el día de hoy se han realizado diversos estudios y seguimientos que han arrojado los siguientes resultados preliminares.

4.1. Evaluación del estado ecológico de los tramos intervenidos

Con la finalidad de determinar si las técnicas de bioingeniería aplicadas contribuyen a la mejora del estado ecológico de los tramos estudiados se han caracterizado ecológicamente dichos tramos antes y después de la ejecución de las obras mediante el uso de índices físico-químicos, biológicos e hidromorfológicos.

Los resultados obtenidos no son todo lo favorables que cabía esperar debido al escaso tiempo transcurrido entre la ejecución de las técnicas y la caracterización posterior. En la siguiente tabla se muestra la clasificación del estado ecológico de los tramos intervenidos de acuerdo con la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH):

CAUCE	ESTADO ECOLÓGICO	
	ANTES DE LA EJECUCIÓN	DESPUÉS DE LA EJECUCIÓN
RÍO TAMUXE	MODERADO	MODERADO
ARROYO VEGA DEL REY	BUENO	MODERADO
RÍO BOEZA	MODERADO	MODERADO
GARGANTA DE CHILLA	MODERADO	MODERADO
ARROYO HIJA DE DIOS	MODERADO	MODERADO
RÍO IBOR	MODERADO	MODERADO
RÍO LINARES	BUENO	MODERADO
RÍO TURIA (Libros)	MODERADO	MODERADO
RÍO TURIA (Villastar)	DEFICIENTE	DEFICIENTE
RÍO SEGURA	BUENO	BUENO
ARROYO PIEDRA LÁ	DEFICIENTE	MODERADO
RÍO BAÑUELOS	DEFICIENTE	DEFICIENTE
RÍO ARA	BUENO	BUENO
RÍO JALÓN	MODERADO	MODERADO
RÍO PIEDRA	MODERADO	MODERADO

Tabla 2. Estado ecológico de los tramos intervenidos antes y después de la ejecución de las técnicas

Destacan los resultados obtenidos en las actuaciones de Vega del Rey y del río Linares, en los que los índices de calidad físico-químicos no han alcanzado los mínimos exigidos para poder considerar el resto de índices de valoración de estado ecológico, y en su caso, permitir el cambio de clase hacia un estado ecológico mejor.

Teniendo en cuenta que los índices habituales utilizados en las redes para el control del estado de las masas de agua no ofrecen resultados concluyentes acerca de la evaluación de la alteración hidromorfológica de los tramos, se está desarrollando una escala de valoración a través de diversos parámetros como son el régimen de caudales, conectividad lateral, efecto barrera, porcentaje de río remansado, naturalidad del trazado y márgenes, lecho del río y vegetación de ribera. Para su desarrollo se ha tomado como actuación piloto la llevada a cabo en el río Piedra (Zaragoza), así mismo se están visitando el resto de actuaciones para valorar el uso de otros parámetros, calibrar cada valoración y establecer posibles condiciones de referencia.

4.2. Eficacia de las principales técnicas ensayadas

Se han realizado dos seguimientos del comportamiento biológico y estructural de las técnicas, uno a los dos meses de finalizar las obras (Seguimiento 1) y otro, un año después (Seguimiento 2).

A continuación se exponen los resultados obtenidos en los dos primeros seguimientos.

4.2.1. Empalizada trenzada

El desarrollo de la vegetación en esta técnica ha sido superior al 40 % excepto en las actuaciones del río Tamuxe y arroyo Vega del Rey en los que un incorrecto diseño de la técnica ha generado que el relleno del trasdós se lavase propiciando una brotación muy escasa. Además se ha observado que han resistido velocidades de flujo de 2,5 m/s sin sufrir daños.

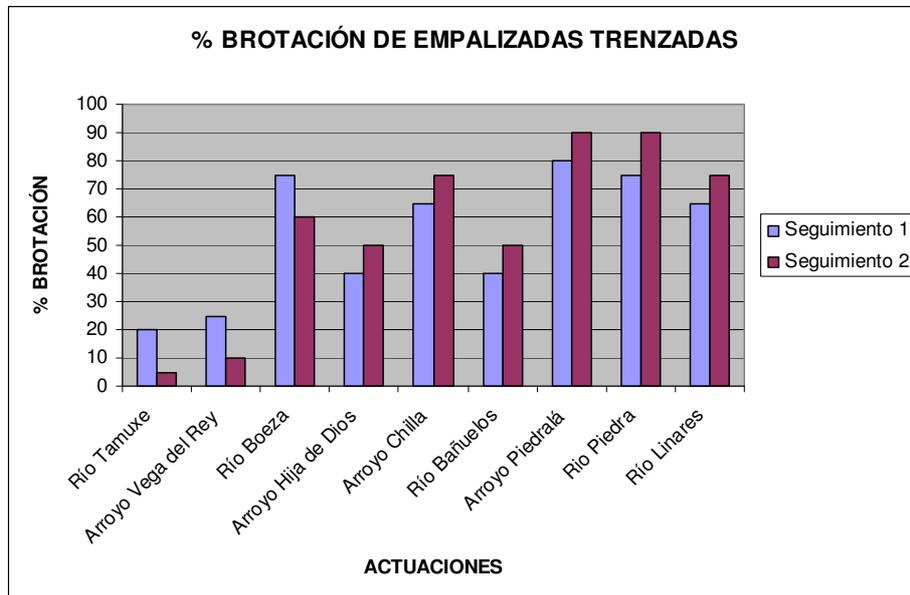
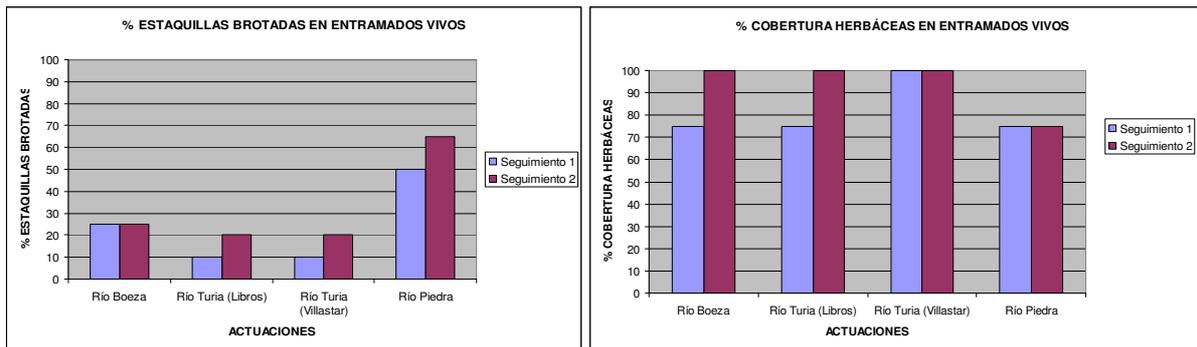


Figura 2. Mapa de distribución de actuaciones

4.2.2. Empalizada de troncos o entramado vivo

Las empalizadas o entramados vivos se han empleado para estabilizar taludes próximos a caminos o a pequeñas infraestructuras. Han resistido velocidades de flujo de 2,9 m/s cumpliendo satisfactoriamente el objetivo buscado a corto plazo, si bien la brotación de esta técnica no es tan alta como en otras, por lo que pudiera verse comprometida la estabilidad de la estructura cuando la madera se degrade. Tras el estudio de diferentes experiencias recopiladas, se estima que si no se supera al menos el 30% de brotación no se asegura la revegetación del talud ni por tanto la estabilidad del mismo a largo plazo.

En las siguientes figuras se pueden observar los porcentajes de estaquillas brotadas y de cobertura herbácea del talud en el que se ha ejecutado un entramado vivo.



Figuras 3 y 4. Porcentaje de estaquillas brotadas (izqda.) y de cobertura herbácea (dcha.) en entramados vivos en los seguimientos 1 y 2

4.2.3. Red o manta orgánica

Han dado muy buen resultado para taludes con pendientes menores de 45° , pues a partir de esta inclinación la red o manta se ha visto sometida a tensiones de tracción que no ha soportado, como es el caso del río Bañuelos donde, con desarrollos de talud superiores a los 4 m y una inclinación media de 50° , se han observado graves desperfectos.

Han resistido velocidades de flujo de 1,5 m/s, aumentando a 1,7 m/s en aquellos casos en los que se ha protegido la base del talud con otra técnica (biorrollos, troncos, escollera, etc.).

La figura que se muestra a continuación refleja los porcentajes de superficie alterada observados en las diferentes actuaciones.

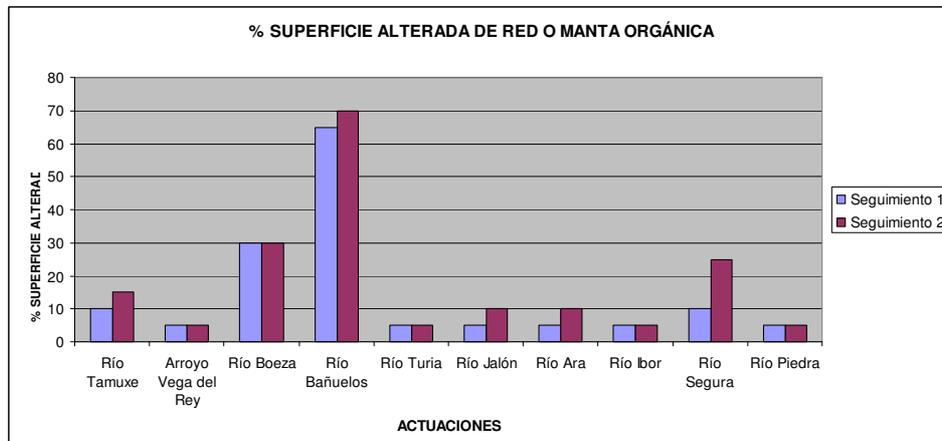
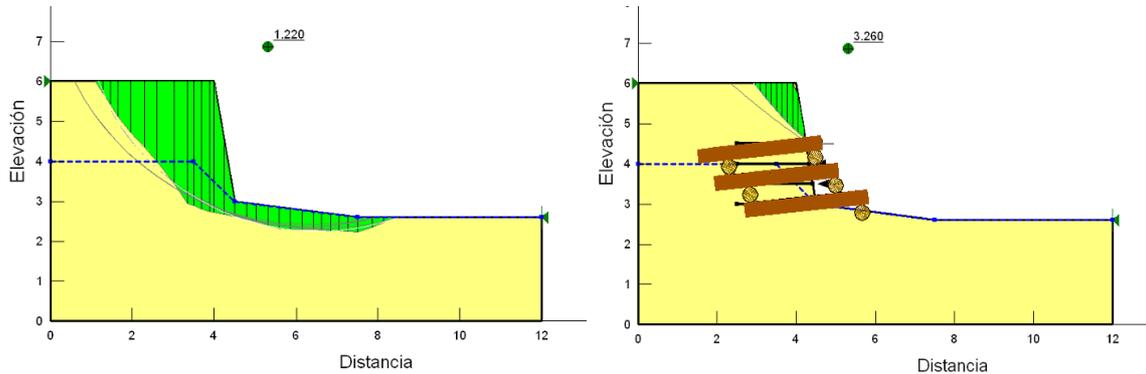


Figura 5. Porcentaje de superficie alterada en los seguimientos 1 y 2

4.2.4. Muro Krainer o empalizada de defensa reforzada

La empalizada de defensa reforzada ha resultado ser una técnica muy eficiente, desde el punto de vista estructural, siendo su comportamiento comparable al de un muro de tierra reforzada, en que los troncos confieren la rigidez necesaria al talud para hacerlo estable, anclando la parte potencialmente deslizante del mismo. La empalizada de defensa reforzada eleva los coeficientes de seguridad del talud considerablemente, como se puede apreciar en las figuras siguientes, resultado de una modelación geotécnica. El círculo de deslizamiento sin empalizada es muy superior al que presentaría el talud con la técnica ejecutada,

presentando además un factor de seguridad mucho menor, 1,220 en el primer caso y 3,260 en el segundo.

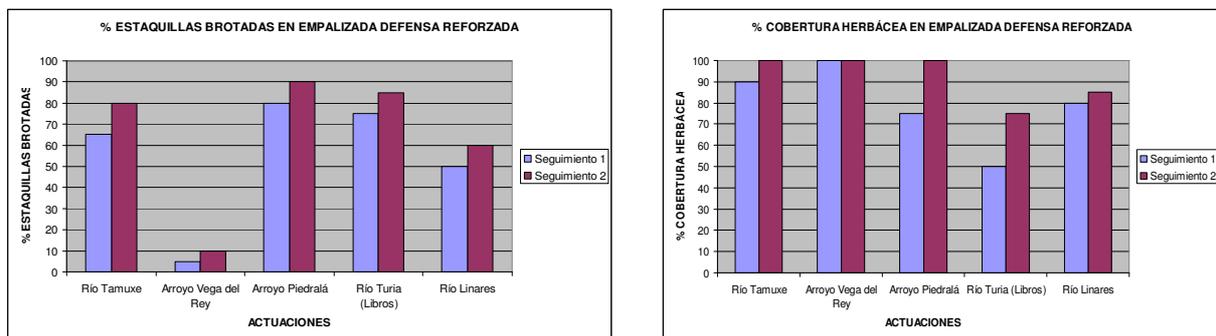


Figuras 6 y 7. Salidas de los modelos geotécnicos, donde se aprecia como afecta la empalizada sobre la superficie de deslizamiento y sobre el coeficiente de seguridad

Han soportado velocidades superiores a 4 m/s y en su ejecución se tuvieron las siguientes precauciones:

- Inclinarse los pisos de la estructura 15° en el extremo en contacto con el agua, hacia arriba. De esta manera se mejora la estabilidad del material entre los pisos de la empalizada.
- Protección del pie con escollera o gavión flexible.
- Machihembrado en los apoyos de los troncos, con lo que se disminuye la superficie expuesta al paso de la corriente.
- Estaquillado y/o plantación entre los diferentes pisos de la estructura, asegurando de este modo la estabilidad una vez se degrade la técnica, y mejorando la cohesión del material empleado por medio del sistema radicular que desarrollan.

En algunos casos se han empleado siembras y/o redes orgánicas para evitar el lavado del material por la parte superior de la empalizada, obteniéndose buenos resultados de cobertura herbácea como se muestra en la siguiente figura.



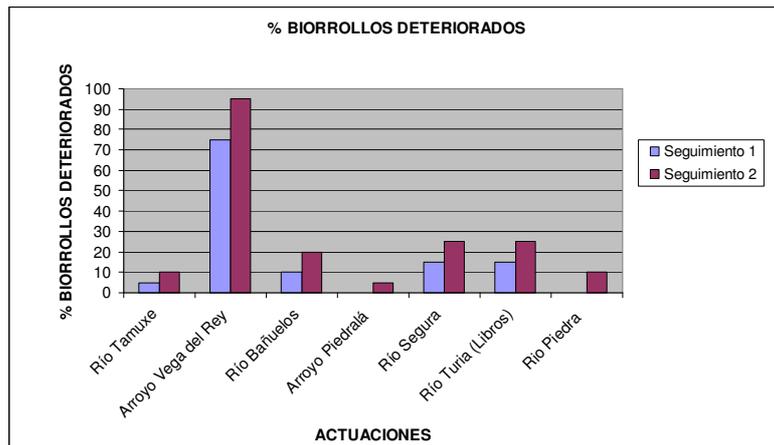
Figuras 8 y 9. Porcentaje de estaquillas brotadas (izqda.) y de cobertura herbácea (dcha.) en empalizadas de defensa reforzada en los seguimientos 1 y 2

4.2.4. Biorrollo

Se ha empleado de forma lineal y formando empalizadas. Las empalizadas han resultado ser una estructura muy sólida, que se estima pueda soportar velocidades y tensiones parecidas

a las de la empalizada de defensa reforzada. Los biorrollos colocados de forma lineal han resistido velocidades de flujo de 2,5 m/s.

En la figura 9 aparecen los porcentajes de biorrollos deteriorados en cada actuación destacando el porcentaje de la actuación del arroyo Vega del Rey, donde se ha producido un desplazamiento y deterioro de los biorrollos. Esto se explica por el aumento de su peso específico a causa de las crecidas, que unido al empuje de la corriente, ha creado tensiones de rotura en los cables o cuerdas de sujeción dejando libres los biorrollos corriente abajo.



Figuras 10. Porcentaje de biorrollos deteriorados en los seguimientos 1 y 2

4.2.4. Tocones, troncos y otros materiales de origen vegetal

Se han empleado raíces, tocones y principalmente troncos en la protección del talud. Han resultado muy eficaces en la protección frente a la erosión y en la relación coste-eficiencia, pues procedían de tratamientos selvícolas previos.

En la actuación del arroyo Vega del Rey se han colocado troncos y biorrollos protegiendo la base del talud y, mientras que hasta un 95 % de los biorrollos han sufrido desperfectos y han sido arrancados, como se explicaba anteriormente, los troncos han permanecido el 100 %, soportando velocidades de hasta 3,5 m/s.

4.3. Aplicación de la modelización hidráulica

Para el diseño de las actuaciones y el estudio del comportamiento estructural de las técnicas de bioingeniería se han modelizado todas las actuaciones. Los resultados de los modelos han sido calibrados con datos de calados y velocidades tomados en campo.

En el tiempo transcurrido desde la ejecución de las obras se han registrado velocidades máximas que en algún caso ya han producido daños. En la siguiente figura se pueden observar las velocidades máximas que ha soportado cada técnica apareciendo marcadas en rojo aquellas que han presentado desperfectos y a partir de que velocidades se han dado.

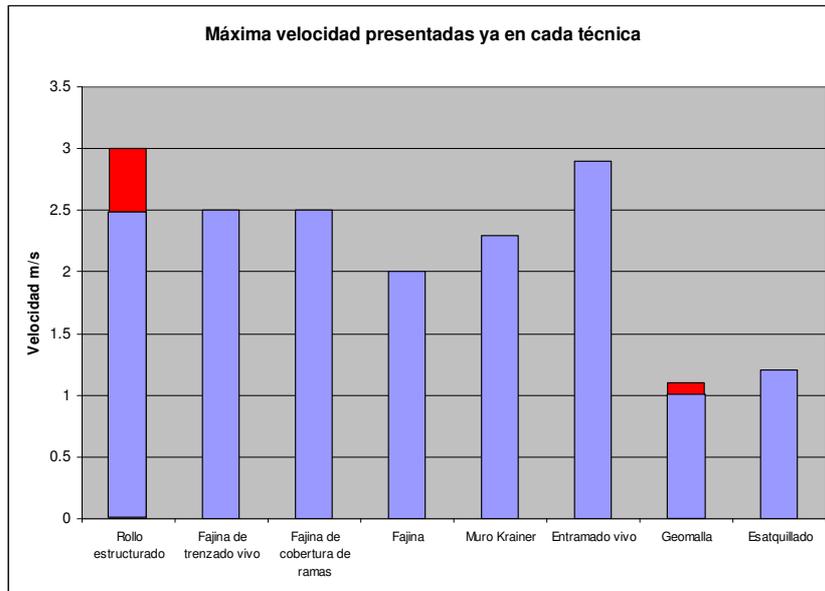


Figura 11. Velocidades máximas presentadas en cada técnica

En el transcurso de los estudios, se han empleado y comparado los resultados que ofrecen los modelos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales, analizando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

En la siguiente figura se muestra que no existen variaciones significativas en cuanto a calado entre ambos tipos de modelo, tomándose el caudal de la máxima crecida ordinaria que no produce desbordamientos en un cauce que puede asemejarse a una sección trapezoidal.

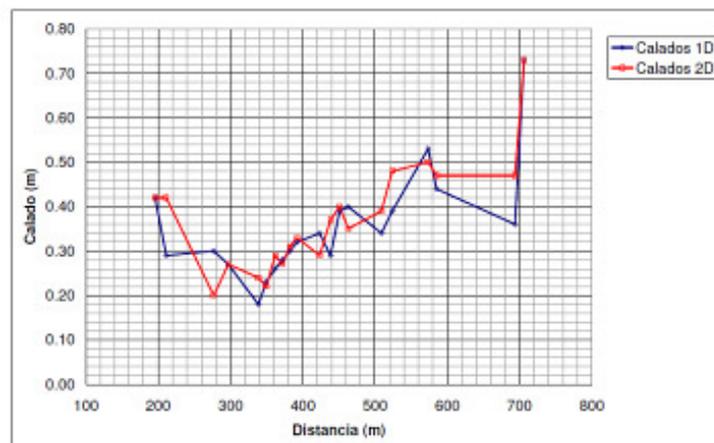
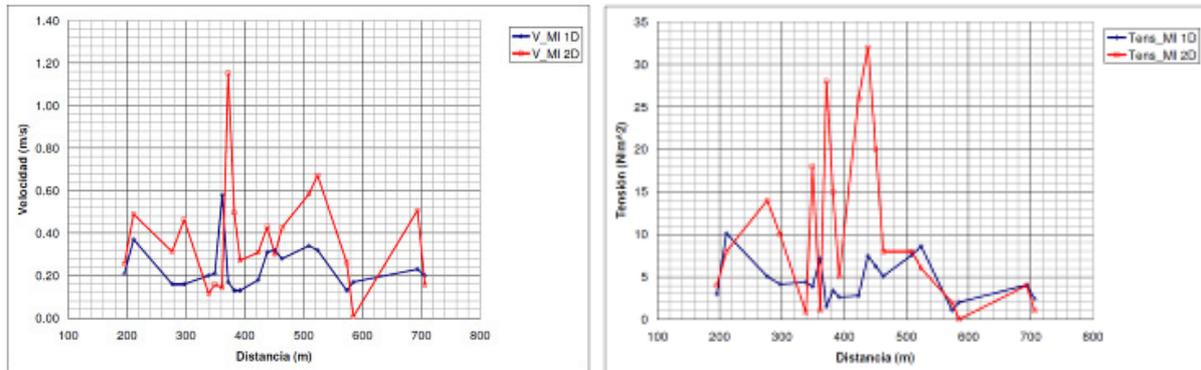


Figura 12. Ejemplo de comparativa de calados en un tramo del río Linares según modelos unidimensionales y bidimensionales

No obstante para caracterizar la distribución de velocidades en una sección, las simplificaciones adoptadas por los modelos unidimensionales dan resultados con diferencias importantes con respecto a la modelización bidimensional como se observa en las siguientes figuras.

Cuantitativamente, las desviaciones entre los resultados de los calados son, como máximo, de un 20 %, entre el modelo unidimensional y bidimensional, mientras que en el análisis de

la velocidad esta diferencia llega al 400 %, diferencia que aumenta aún más si cabe en el estudio de las tensiones, lo que hace necesario emplear en el diseño modelos bidimensionales. En las siguientes figuras se observan las grandes diferencias obtenidas con modelos unidimensionales y bidimensionales en velocidades y tensiones.



Figuras 13 y 14. Ejemplos de comparativa de velocidades (izqda.) y tensiones (dcha.) en un tramo del río Linares con modelos unidimensionales y bidimensionales en la margen izquierda del cauce

5. CONCLUSIONES

A continuación se exponen brevemente algunas de las conclusiones extraídas en la ejecución y seguimiento de este proyecto.

5.1. Estado ecológico

Se ha observado que los resultados obtenidos hasta la fecha no son concluyentes y por tanto, se estima necesario prolongar la fase de seguimiento del estado ecológico durante, al menos, 5 años después de la ejecución de las técnicas para posibilitar la evolución de la actuación hasta alcanzar su estado óptimo.

Por otro lado se ha comprobado que los índices habituales utilizados en las redes para el control del estado de las masas de agua no ofrecen resultados concluyentes acerca de la evaluación de la alteración hidromorfológica de los tramos. Por ello, en el marco de este trabajo se ha diseñado un sistema, en el que se valoran conjuntamente aspectos como la alteración del régimen de caudales, la conectividad lateral, el efecto barrera, el porcentaje de río remansado, la naturalidad del trazado y las márgenes, el lecho del río y la vegetación de ribera, cada uno de ellos, a su vez, evaluados por medio de índices e indicadores ya existentes y contrastados. Para su desarrollo se ha tomado como actuación piloto la llevada a cabo en el río Piedra (Zaragoza).

Una vez valorado cada parámetro se marca su resultado en un gráfico radial y se mide el área encerrada por la unión de los distintos valores como se muestra en la siguiente figura. Cuanto mayor sea el área, menor es la alteración del tramo estudiado.

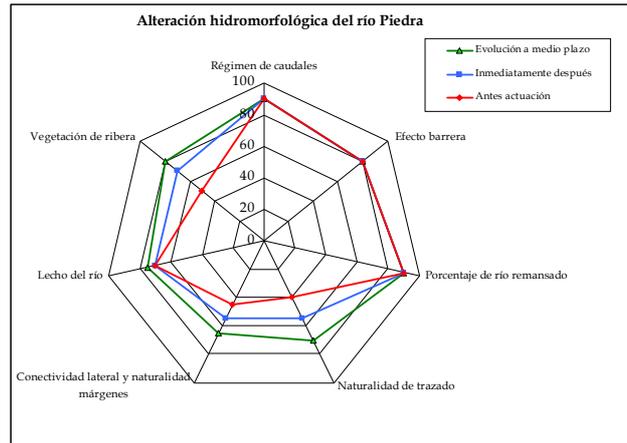


Figura 15. Prueba piloto de índice hidromorfológico que valore las obras de mejora ecológica

5.2. Técnicas de bioingeniería

Se considera indispensable utilizar modelos bidimensionales ya que permiten tomar decisiones con mayor precisión que los unidimensionales, seleccionando la ubicación, técnica y dimensionamiento idóneo, más aun cuando ya hay modelos de libre difusión.

Estos estudios permiten diagnosticar las causas que provocan la erosión, decidir en qué tramos se debe actuar, seleccionar las técnicas más idóneas y dimensionarlas correctamente reduciendo costes.

5.3. Modelización hidráulica

Con la información recopilada durante la ejecución y seguimiento del proyecto se han elaborado tablas con posibles combinaciones de técnicas en función de la pendiente del talud, velocidad del flujo e importancia del elemento a proteger. Así mismo se han confeccionado fichas de cada combinación exponiendo el ámbito de aplicación, la fase constructiva, recomendaciones de ejecución y criterios de dimensionamiento que resultarán muy útiles en el diseño de nuevas actuaciones.

5.4. Consideraciones finales

La principal conclusión a la que se ha llegado en el desarrollo de este proyecto es que la bioingeniería constituye una herramienta eficaz para la estabilización de taludes en ríos si bien, en general, se recomienda contemplar la opción de no intervención en aquellos casos en los que se pueda permitir cierta libertad fluvial. En los tramos en los que la erosión afecte a la seguridad de personas, infraestructuras u otros bienes, se debe estudiar cuál es la técnica o combinación de técnicas más indicada en cada caso, determinando con precisión la ubicación y las dimensiones óptimas con la ayuda de las herramientas técnicas, de modelización, etc. actualmente existentes.

El seguimiento desarrollado hasta ahora arroja aún resultados parciales y se estima que se necesitarán varios años para comprobar la resistencia y evolución de las técnicas frente a fenómenos de avenida y de climatología adversa que aún no se han presentado.