

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

SÁNCHEZ MARTÍNEZ, F. J.<sup>1</sup>, APARICIO MARTÍN, M.<sup>1</sup>, SAIZ DE LA HOYA ZAMACOLA, A.<sup>2</sup>, GARCÍA-GUIJAS REDONDO, J. M.<sup>2</sup>, HERNANZ SÁNCHEZ, M.<sup>2</sup>, GONZÁLEZ SÁNCHEZ, M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Subdirección de Gestión Integrada del Dominio Público Hidráulico. Dirección General del Agua. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

<sup>2</sup>Subdirección Actuaciones Medioambientales. Dirección Técnica de Tragsa.

### Resumen

Las técnicas de bioingeniería constituyen una de las herramientas que se están empleando para estabilizar determinadas zonas de cursos de ríos afectadas por erosión, de forma compatible con la mejora de su estado ecológico tal como exige la Directiva Marco del Agua. El Proyecto de I+D+i de optimización de técnicas de bioingeniería para la mejora del estado ecológico y estabilización de los márgenes de los ríos, encomendado a TRAGSA por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, se enmarca dentro de la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos y ha pretendido contribuir a la mejora del conocimiento de estas técnicas evaluando su eficacia mediante diferentes protocolos de seguimiento.

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 fajinas, instalación de geomallas y mantas orgánicas, construcción de muros Krainer, entramados vivos, instalación de rollos estructurados, etc.

### Palabras clave

Bioingeniería, ríos, rollos, fajinas, Krainer.

### 1. Introducción

Enmarcado en la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos, la Dirección General del Agua encomienda a Tragsa en el año 2009 el proyecto de I+D+i para optimizar el uso de técnicas de bioingeniería en la estabilización de los márgenes de los ríos y la mejora del estado ecológico de los mismos.

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.

Se han seleccionado quince tramos de aplicación en siete Confederaciones Hidrográficas con problemas de erosión pero cuyas causas, y condiciones climáticas e hidrológicas, son muy diferentes. Las técnicas se han empleado individualmente o combinadas al objeto de maximizar la eficacia de la intervención.

Tabla 1. Distribución de actuaciones y técnicas empleadas

Confederación Hidrográfica	Provincia	Términos municipales	Cauce	Técnicas ensayadas								
				Plantación	Estaquillado	Fajina	Red o manta orgánica	Muro Krainer o empalizada de defensa reforzada	Empalizada o entramado vivo	Gavión	Biorrollo	Protección con material vegetal
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 de 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									

## 53 2. Objetivos

54

55 El objetivo principal del proyecto ha sido determinar si la bioingeniería es aplicable en  
56 los cursos de agua de la Región Mediterránea y si las especies vegetales que se utilizan,  
57 permiten la adaptación a épocas de estiaje y a las perturbaciones derivadas de los agentes  
58 climáticos que se dan en estos cauces. Hasta los últimos años, en España eran escasos los  
59 proyectos en esta línea mientras que se tiene constancia de su efectividad en países de Centro  
60 Europa en el ámbito fluvial.

61

62 También se pretende profundizar en los criterios de diseño para seleccionar la técnica  
63 más adecuada para cada problemática y ámbito geográfico, establecer indicadores de  
64 seguimiento eficaces y objetivamente verificables para evaluar el grado de viabilidad de las  
65 técnicas y una vez finalizado el seguimiento, divulgar los resultados y conclusiones que  
66 establecerán posibilidades de aplicación a nivel regional o nacional.

67

## 68 3. Metodología

69

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

74

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

77

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

81

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

87

## 88 4. Resultados

89

90 En el tiempo transcurrido desde la ejecución de las técnicas, se han realizado diversos  
91 estudios y seguimientos cuyos resultados preliminares se muestran a continuación.

92

### 93 4.1. Evaluación del estado ecológico de las actuaciones

94

95 Se ha evaluado la mejora del estado ecológico de los tramos fluviales intervenidos  
96 comparando el resultado de índices físico-químicos, biológicos e hidromorfológicos antes y  
97 después de la ejecución de las técnicas de bioingeniería.

98

99 A continuación se muestra la clasificación del estado ecológico de las actuaciones de  
 100 acuerdo con la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH):  
 101

102

Tabla 2. Datos registrados en el seguimiento.

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

103

104 En las actuaciones en el arroyo de Vega del Rey y río Linares, los resultados obtenidos  
 105 tras la ejecución de las obras se deben a que, en estos dos casos, los índices de calidad físico-  
 106 químicos no alcanzaron los mínimos exigidos para poder considerar el resto de índices en la  
 107 valoración del estado y, en su caso, permitir el cambio de clase hacia un mejor estado  
 108 ecológico.

109

#### 110 **4.2. Eficacia de las principales técnicas ensayadas**

111

112 Se han realizado dos seguimientos, uno a los dos meses de finalizar la ejecución de las  
 113 obras (Seguimiento 1) y otro, un año después de la finalización de las obras (Seguimiento 2).  
 114 En estos seguimientos se han observado los siguientes resultados:

115

##### 116 4.2.1. Fajinas

117

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

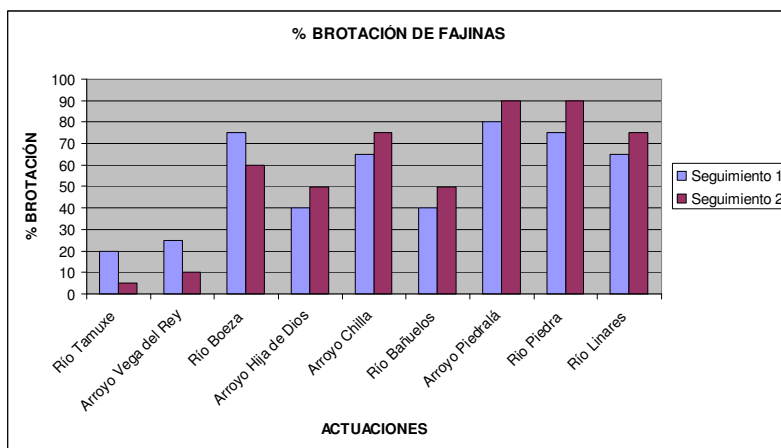


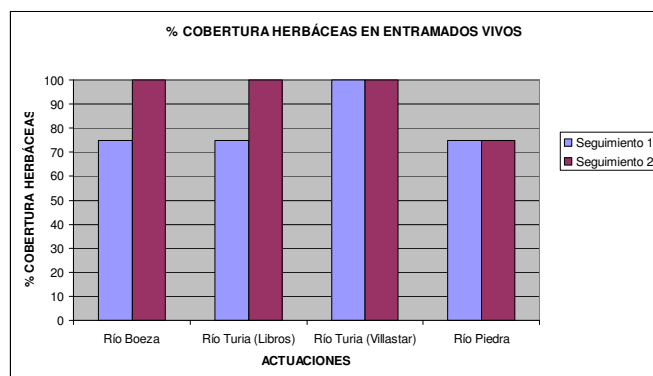
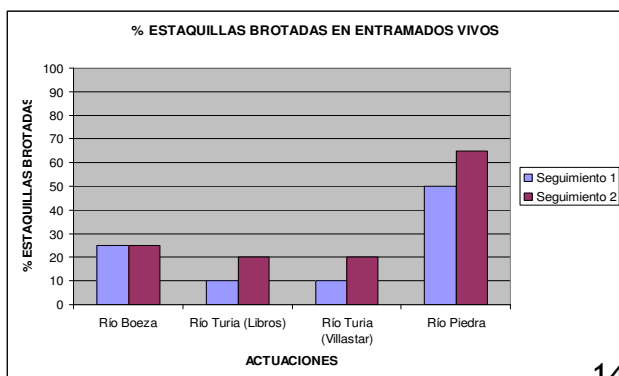
Figura 1. Porcentaje de fajinas brotadas en los seguimientos 1 y 2

123  
124  
125  
126  
127

4.2.2. Empalizada o entramado vivo

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

135  
136 En las siguientes figuras se pueden observar los porcentajes de estaquillas brotadas y de  
137 cobertura herbácea del talud en el que se ha ejecutado un entramado vivo.  
138



139 140 Figuras 2 y 3. Porcentaje de estaquillas brotadas (izqda.) y de cobertura herbácea (dcha.) en entramados vivos en los seguimientos 1 y 2

142  
143  
144

4.2.3. Red o manta orgánica

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

149  
 150 Han resistido velocidades de flujo de 1,5 m/s, aumentando a 1,7 m/s en aquellos casos  
 151 en los que se ha protegido la base del talud con otra técnica (biorrollos, troncos, escollera,  
 152 etc.).

153  
 154 La figura que se muestra a continuación refleja los porcentajes de superficie alterada  
 155 observados en las diferentes actuaciones.  
 156

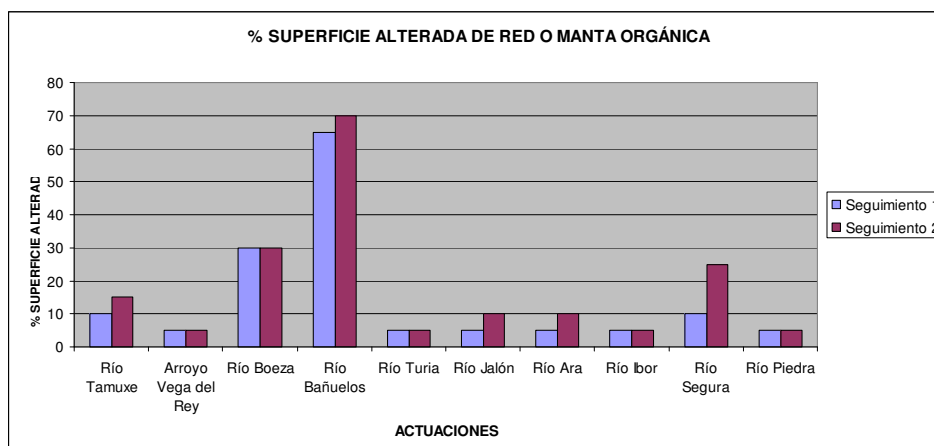
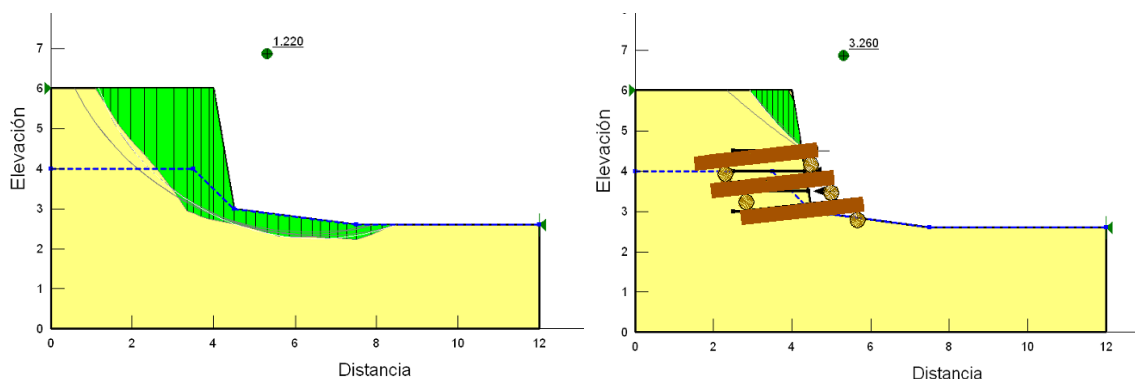


Figura 3. Porcentaje de superficie alterada en los seguimientos 1 y 2

157  
 158  
 159  
 160 Asimismo se han observado buenos resultados en las actuaciones del río Ibor y río  
 161 Piedra, en las que la disposición en el talud de la red o manta orgánica se realizó en bandas  
 162 paralelas al cauce.

#### 164 4.2.4. Muro Krainer o empalizada de defensa reforzada

165  
 166 La empalizada de defensa reforzada ha resultado ser una técnica muy eficiente, desde el  
 167 punto de vista estructural, siendo su comportamiento comparable al de un muro de tierra  
 168 reforzada, en que los troncos confieren la rigidez necesaria al talud para hacerlo estable,  
 169 anclando la parte potencialmente deslizable del mismo. La empalizada de defensa reforzada  
 170 eleva los coeficientes de seguridad del talud considerablemente, como se puede apreciar en  
 171 las figuras siguientes, resultado de una modelación geotécnica. El círculo de deslizamiento sin  
 172 empalizada es muy superior al que presentaría el talud con la técnica ejecutada, presentando  
 173 además un factor de seguridad mucho menor, 1,220 en el primer caso y 3,260 en el segundo.  
 174



Figuras 4 y 5. Salidas de los modelos geotécnicos, donde se aprecia como afecta la empalizada sobre la superficie de deslizamiento y sobre el coeficiente de seguridad

175  
176  
177

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

180

- Inclinar 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.

182

- Protección del pie con escollera o gabión flexible.

183

- Machihembrado en los apoyos de los troncos, con lo que se disminuye la superficie expuesta al paso de la corriente.

184

- 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.

185

186

Los resultados de los ensayos realizados muestran que solo en el primer y segundo piso de las empalizadas se justifica la inserción de estaquillas en la estructura, alcanzando en estos casos un porcentaje de supervivencia en torno al 80 %.

187

188

189

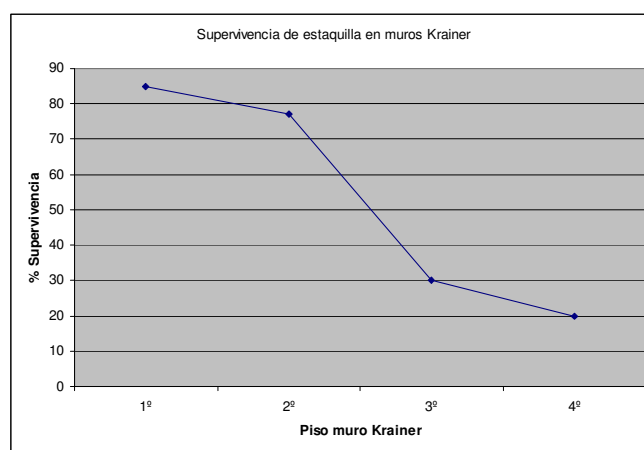


Figura 6. Porcentaje medio de supervivencia de estaquillas para los distintos pisos de todos los muros Krainer ensayados en el proyecto

194  
195  
196  
197

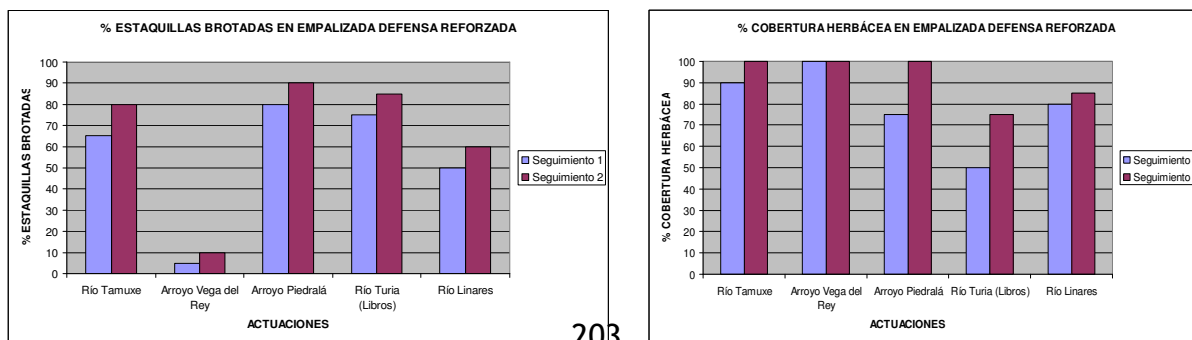
En algunos casos se han empleado siembras y/o redes orgánicas para evitar el lavado del material por la parte superior de la empalizada, obteniéndose buenos resultados de cobertura herbácea como se muestra en la siguiente figura.

198

199

200

201



202

203

Figuras 7 y 8. Porcentaje de estaquillas brotadas (izqda.) y de cobertura herbácea (dcha.) en empalizadas de defensa reforzada en los seguimientos 1 y 2

204  
205

206

#### 207 4.2.5. Biorrollo

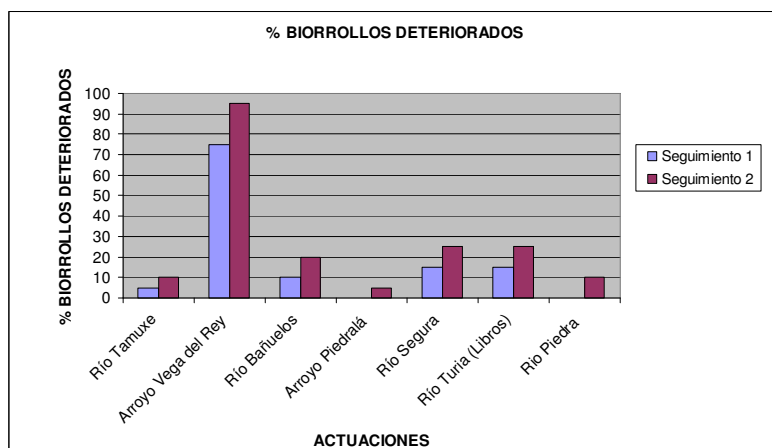
208

209 Se ha empleado de forma lineal y formando empalizadas. Las empalizadas han  
 210 resultado ser una estructura muy sólida, que se estima pueda soportar velocidades y tensiones  
 211 parecidas a las de la empalizada de defensa reforzada. Los biorrollos colocados de forma  
 212 lineal han resistido velocidades de flujo de 2,5 m/s.

213

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

219



Figuras 9. Porcentaje de biorrollos deteriorados en los seguimientos 1 y 2

220

221

222

#### 223 4.2.6. Protección de talud mediante el uso de material vegetal

224

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

228

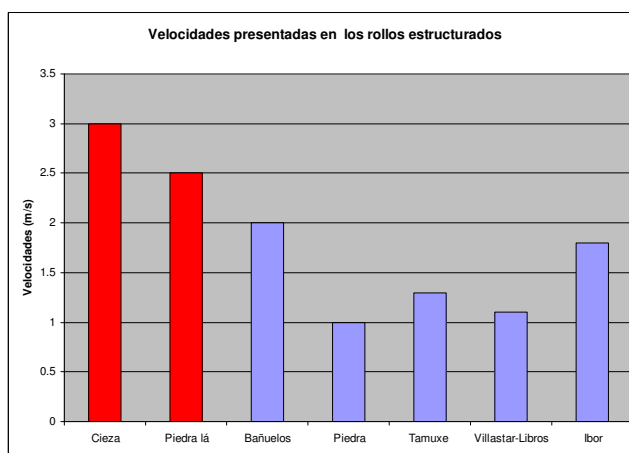
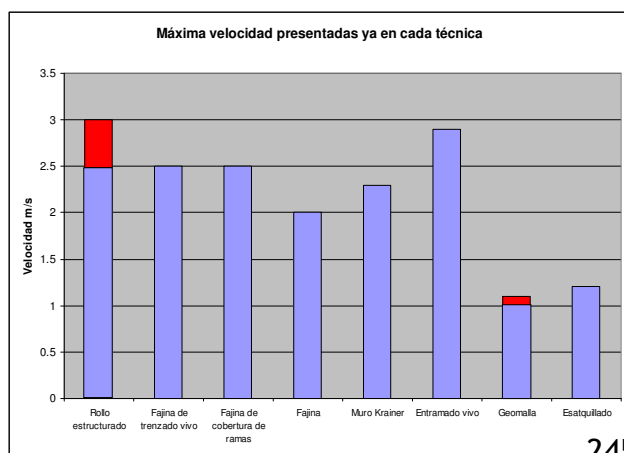


229 En la actuación del arroyo Vega del Rey se han colocado troncos y biorrollos  
 230 protegiendo la base del talud y, mientras que hasta un 95 % de los biorrollos han sufrido  
 231 desperfectos y han sido arrancados, como se explicaba anteriormente, los troncos han  
 232 permanecido el 100 %, soportando velocidades de hasta 3,5 m/s.  
 233

### 234 4.3. Modelización hidráulica

235  
 236 Se han modelizado todas las actuaciones y, en aquellas en que se han observado  
 237 deterioros, ha sido posible establecer la relación del daño con los valores de las variables  
 238 hidráulicas para las que se produce el fallo. Los resultados de los modelos han sido calibrados  
 239 con datos de calados y velocidades tomados en campo.  
 240

241 Las velocidades que ya se han registrado en las diferentes técnicas se pueden ver en las  
 242 siguientes figuras. Aquellas velocidades que han producido daños se han marcado en rojo.  
 243



244 Figuras 10 y 11. Velocidades de flujo presentadas en cada técnica (izqda.) y presentadas en tramos con rollos estructurados  
 246 marcándose en rojo en aquellas actuaciones que han presentado daños  
 247

248  
 249 Respecto a los modelos hidráulicos, se han empleado y comparado los resultados que  
 250 ofrecen los unidimensionales y bidimensionales, analizando las ventajas e inconvenientes de  
 251 cada uno de ellos, ya que hasta ahora se habían venido usando fundamentalmente los modelos  
 252 unidimensionales. Como se aprecia en la figura siguiente, para un tramo de ensayo, no hay  
 253 diferencias significativas en las variaciones del calado entre ambos modelos, para el caudal de  
 254 la máxima crecida ordinaria que no produce desbordamientos en un cauce que puede  
 255 asemejarse a una sección trapezoidal.  
 256

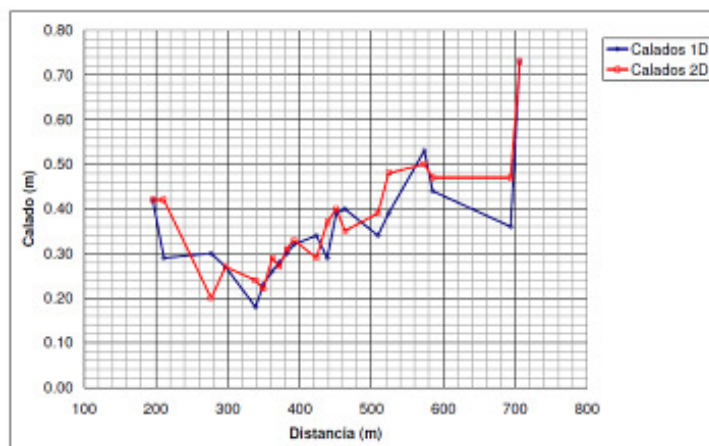
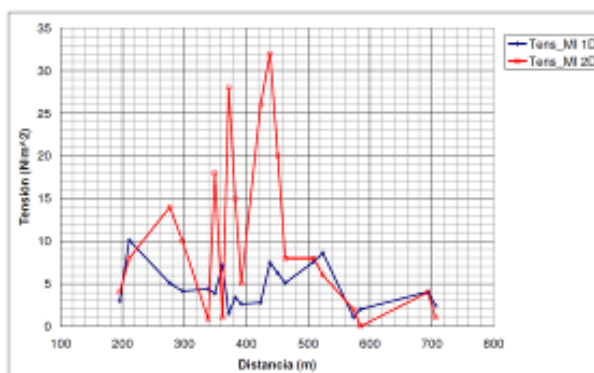
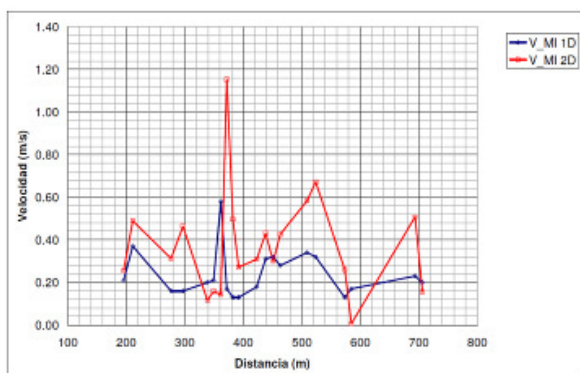


Figura 12. Ejemplo de comparativa de calados en un tramo del río Linares según modelos unidimensionales y bidimensionales

257  
258  
259  
260

261 No obstante para caracterizar la distribución de velocidades en una sección, las  
262 simplificaciones adoptadas por los modelos unidimensionales dan resultados con diferencias  
263 importantes con respecto a la modelización bidimensional como se observa en las siguientes  
264 figuras.  
265



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

266  
267  
268  
269

270 Cuantitativamente, las desviaciones entre los resultados de los calados son, como  
271 máximo, de un 20 %, entre el modelo unidimensional y bidimensional, mientras que en el  
272 análisis de la velocidad esta diferencia llega al 400 %, diferencia que aumenta aún más si cabe  
273 en el estudio de las tensiones, lo que hace necesario emplear en el diseño modelos  
274 bidimensionales.  
275

## 276 5. Conclusiones

277

### 278 5.1. Estado ecológico

279

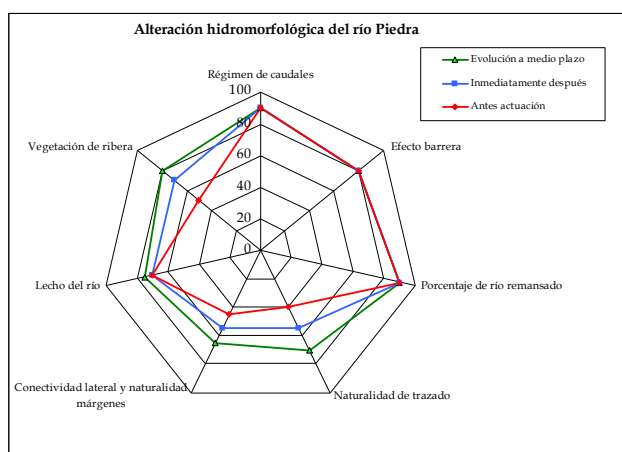
280 Se ha observado que los resultados obtenidos hasta la fecha no son concluyentes y por  
281 tanto, se estima necesario prolongar la fase de seguimiento del estado ecológico durante, al

282 menos, 5 años después de la ejecución de las técnicas para posibilitar la evolución de la  
 283 actuación hasta alcanzar su estado óptimo.

284  
 285 Por otro lado se ha comprobado que los índices habituales utilizados en las redes para  
 286 el control del estado de las masas de agua no ofrecen resultados concluyentes acerca de la  
 287 evaluación de la alteración hidromorfológica de los tramos. Por ello, en el marco de este  
 288 trabajo se ha diseñado un sistema, en el que se valoran conjuntamente aspectos como la  
 289 alteración del régimen de caudales, la conectividad lateral, el efecto barrera, el porcentaje de  
 290 río remansado, la naturalidad del trazado y las márgenes, el lecho del río y la vegetación de  
 291 ribera, cada uno de ellos, a su vez, evaluados por medio de índices e indicadores ya existentes  
 292 y contrastados. Para su desarrollo se ha tomado como actuación piloto la llevada a cabo en el  
 293 río Piedra (Zaragoza).

294  
 295 Una vez valorado cada parámetro se marca su resultado en un gráfico radial y se mide el  
 296 área encerrada por la unión de los distintos valores como se muestra en la siguiente figura.  
 297 Cuanto mayor sea el área, menor es la alteración del tramo estudiado.

298



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

300

301

### 302 **5.3. Modelización hidráulica**

303

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

307

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

311

### 312 **5.2. Elección y ejecución de técnicas de bioingeniería**

313

314 Con la información recopilada durante la ejecución y seguimiento del proyecto se han  
 315 elaborado tablas con posibles combinaciones de técnicas en función de la pendiente del talud,  
 316 velocidad del flujo e importancia del elemento a proteger. Así mismo se han confeccionado  
 317 fichas de cada combinación exponiendo el ámbito de aplicación, la fase constructiva,

318 recomendaciones de ejecución y criterios de dimensionamiento que resultarán muy útiles en  
319 el diseño de nuevas actuaciones.

320

#### 321 **5.4. Consideraciones finales**

322

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

331

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

335

#### 336 **6. Bibliografía**

337

338 ZEH, H.; 2007. Ingeniería Biológica. Editorial VDF. 441 p. Zurich.

339

340 ADAM P., DEBAIS N.; GERBER F.; LACHAT B. 2008. Le génie végétal- Manuel  
341 technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques.  
342 Ministère de l'écologie de développement et l'aménagement du territoire. 290 p.

343

344 SCHMIDT, G; OTAOLA-URRUTXI, M. 2002. Aplicación de técnicas de  
345 bioingeniería en la restauración de ríos y riberas. CEDEX. 111 p. Madrid.

346

347 MAGDALENO, F. 2008. Manual de Técnicas de bioingeniería. CEDEX, 300p.  
348 Madrid.

349

350 GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, M.; GARCÍA DEL JALÓN, D. 2007. Restauración de  
351 Ríos. Guía metodológica para la elaboración de proyectos.318p. Madrid.

352