

9CFE-1884



Aplicación de la bioingeniería en obras forestales en montes públicos y cauces de Catalunya

SOLANELLES UBACH, M. (1), SAN ROMÁN SAN ROMÁN, C. (2)

1. Forestal Catalana, SA, Generalitat de Catalunya
2. Direcció general de Boscos i Gestió del Medi, Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació, Generalitat de Catalunya

Resumen

En las últimas décadas el uso de técnicas de bioingeniería en la obra civil ha vivido un impulso importante como respuesta a las demandas de la integración en el paisaje de las obras. La bioingeniería es una técnica que utiliza el material vegetal como elemento de construcción y regeneración ambiental, cumpliendo objetivos técnicos, ecológicos, paisajísticos y socioeconómicos.

En el campo de la ingeniería de montes, todavía tiene más importancia al tratarse de infraestructuras que se realizan en el medio natural. Aunque el uso de materiales naturales que se pueden obtener en el entorno inmediato siempre ha estado presente en el diseño de las obras forestales, la necesidad de reducir los impactos ambientales, la dificultad y coste que supone llevar determinados materiales a ubicaciones remotas donde en ocasiones se necesita trabajar en el ámbito forestal y la obligación de integrar las obras en el medio natural, ha provocado que cada vez se diseñen más obras con este enfoque.

Se presentan las principales obras forestales de bioingeniería realizadas por la administración forestal catalana en montes públicos y en cauces. La discusión se centra en la motivación de su construcción, sus características técnicas y de diseño y el resultado de su puesta en servicio.

Palabras clave

Material vegetal, medio natural, impacto ambiental.

1.Introducción

Las técnicas de bioingeniería habían sido utilizadas tradicionalmente cuando los ingenieros contaban con mano de obra y materiales locales como únicos recursos, y la mecanización era escasa. La aparición de maquinaria y el acceso a nuevos materiales provocó un abandono de estas técnicas. Décadas después estas técnicas vuelven a estar implantadas en las ramas de la ingeniería (RAUCH 2022).

Son numerosas las causas que han impulsado la recuperación de la bioingeniería en las obras forestales. La necesidad y la demanda de una integración paisajística de las obras en el medio natural, una mayor sensibilidad hacia el uso de materiales naturales, las orientaciones de la reglamentación de la UE en materia de restauración de la naturaleza explican el auge vivido en los últimos años.

El Pirineo catalán es una zona donde históricamente se han realizado obras de corrección hidrológico-forestal. Un recorrido por las numerosas obras emblemáticas de esta zona es un reflejo de la evolución histórica de la propia ingeniería de montes. En el último decenio algunas obras se han diseñado con estructuras de bioingeniería. El estudio y análisis de las obras ejecutadas es importante para evaluar la eficiencia de esta técnica frente a las obras clásicas, y para mejorar los futuros proyectos donde se puedan contemplar este tipo de estructuras.

2.Objetivos

Esta comunicación tiene por objetivos:



1. Presentar las obras de restauración hidrológico-forestal realizadas con técnicas de bioingeniería en montes públicos catalanes, describiendo la motivación de su construcción, sus características técnicas y de diseño.
2. Realizar una evaluación de la puesta en servicio y vida útil de las obras de bioingeniería, analizando los principales cambios de resistencia mecánica de los materiales biodegradables i el desarrollo de la vegetación.
3. Proponer las mejoras y actuaciones más relevantes que es preciso plantear para la consecución de los objetivos que motivaron la realización de dichas obras.

3. Metodología

Se ha realizado una revisión de todas las obras de restauración hidrológico-forestal en que se han utilizado técnicas de bioingeniería, ejecutadas en montes públicos y cauces por la Direcció General de Boscos i Gestió del Medi del Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació de la Generalitat de Catalunya en los últimos quince años

Estas engloban tanto obras realizadas como respuesta a alguna emergencia, como obras planificadas dentro del plan económico financiero (PEF) de dicha Dirección General.

Estas obras están distribuidas principalmente en el Pirineo catalán y en municipios afectados por las riadas de los últimos años vinculadas a fenómenos meteorológicos extremos (Dana, Gloria, Filomena...)

Se ha analizado su diseño, ejecución, funcionalidad y estado actual. Así mismo, se han propuesto mejoras y se ha realizado una comparativa de ventajas e inconvenientes de estas actuaciones de bioingeniería respecto a las posibles soluciones con obras convencionales.

4. Resultados

Se describen cinco obras de restauración hidrológico-forestal realizadas con técnicas de bioingeniería en montes públicos catalanes:

1. CORRECCIÓN HIDROLÓGICO FORESTAL EN LA MONTAÑA DE MERANGES-CERDANYA (2009)
2. ACTUACIONES DE EMERGENCIA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICA EN EL INCENDIO DE CALVINYÀ - ALT URGELL (2012)
3. RESTAURACIÓN DAÑOS PROVOCADOS POR LA LLUVIA TORRENCIAL EN LOS ACCESOS MONTAÑA SANT MIQUEL - RIPOLENS (2019)
4. PROTECCIÓN DE MARGENES DEL RÍO CARDENER A LA ALTURA DE LA COMA (FASE 4) - SOLSONÉS (2021)
5. OBRA DE EMERGENCIA PARA LA ADECUACIÓN DEL CAUCE DEL RIO GORG AL ALBI- LES GARRIGUES (2021)

Estas obras están distribuidas principalmente en el Pirineo catalán excepto la obra de l'Albi. En la figura siguiente se muestra su localización:

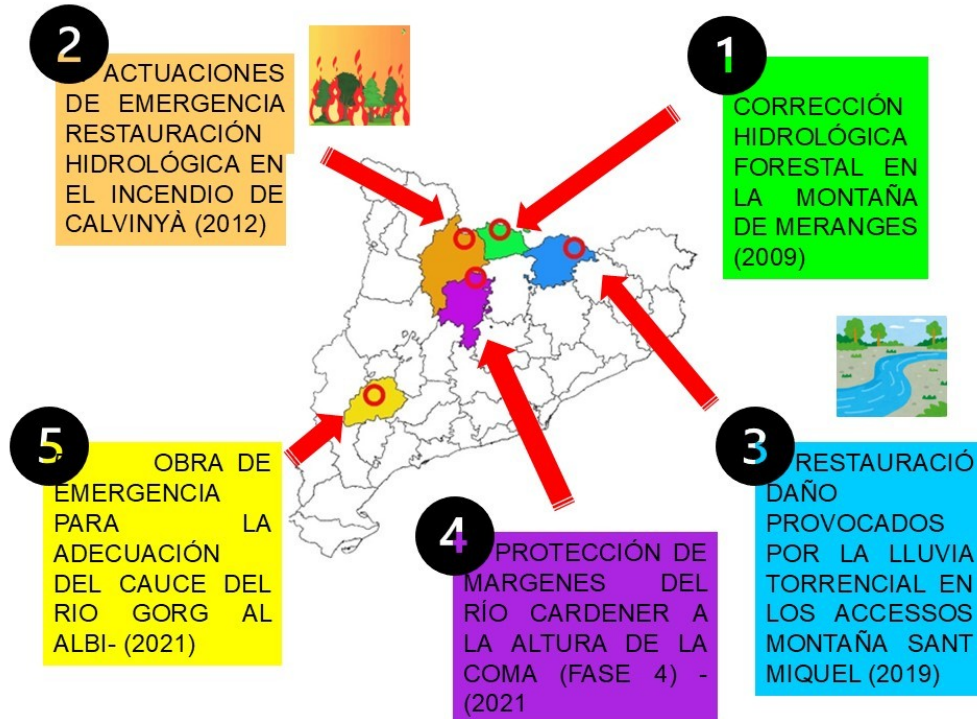


Figura 1. Ubicación de las obras forestales realizadas con técnicas de bioingeniería en montes públicos catalanes.

4.1 Corrección hidrológica forestal en la Montaña de Meranges- Cerdanya (2009)

Se realizó la corrección hidrológica forestal de dos torrentes del monte público de la montaña de Meranges CUP 21Gi. Estos dos torrentes afectan a dos pueblos situados en los conos de deyección. En el mapa siguiente se muestra la ubicación de los dos torrentes dentro del monte público.

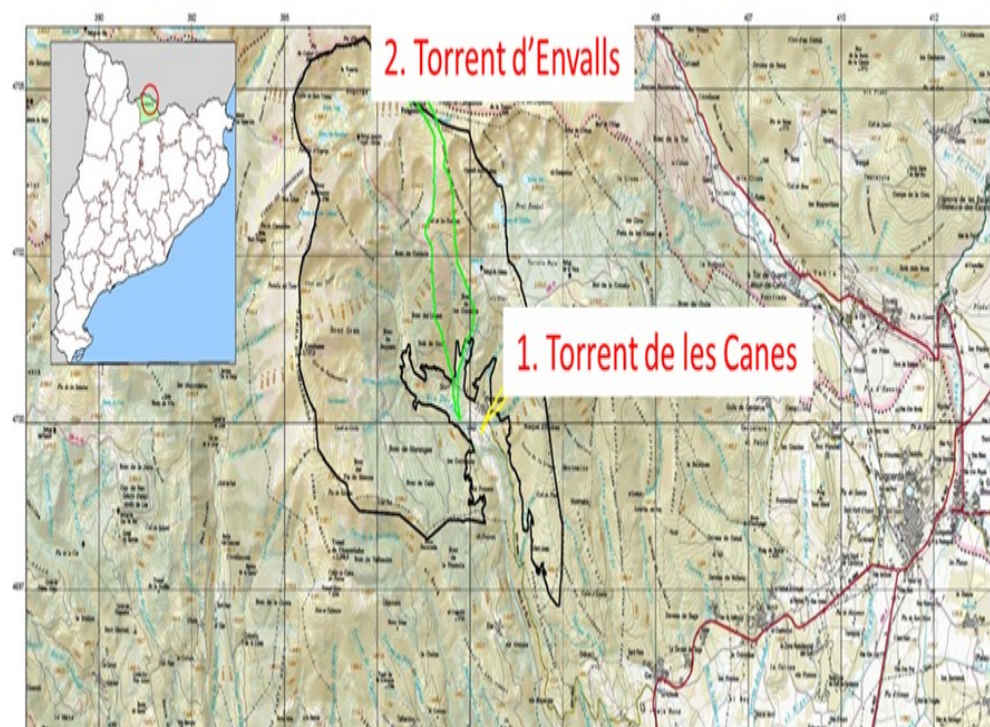


Figura 2. Ubicación del monte público y de las cuencas de los dos torrentes donde se

realizaron las obras.

El día 23 de julio del año 2002 se produjo un importante aguacero que provocó desprendimientos y caídas de bloques en el torrente de Envalls. Se produjeron daños importantes a la carretera de acceso al monte.



Figura 3. Fotos de la pista de acceso al monte con el tráfico restablecido, después de su obstrucción por los acarreos y bloques movilizados en el torrente.

El día 30 de junio de 2006 en el Torrent de las Canes, la precipitación acumulada arrastró un volumen importante de material sólido que obstruyó totalmente la entrada del pueblo con toneladas de gravas y tierras.



Figura 4. Vista general del torrente de les Canes con el pueblo de Meranges situado en el cono de deyección y fotos de la pista de acceso al pueblo y al monte obstruida por los acarreos movilizados en el episodio de lluvias.

Los objetivos específicos de esta obra eran:

- La protección de las infraestructuras.
- La corrección de las cárcavas y de la erosión remontante.
- La protección del suelo frente a la erosión laminar.
- La estabilización de las vertientes del torrente.

En esta obra se combinaron estructuras de ingeniería clásica con técnicas de bioingeniería. Las obras que se realizaron en cada uno de los torrentes fueron las siguientes:

ZONA	ACTUACIÓN		MEDICIONES	
Torrent de les Canes	4.900 m	²		
300 m	³			
620 m	²			
620 m	²		y 4 unidades	
Torrent d'Envalls			8,9 ha	
5,1 m	³	y 9,6 m	³	
			2,5 m x 2,5 m x 8 m	
62 m	³			
90 m	³	y 112,5 m	³	
85 m	³	x 2, tramo1: 54 m	³	x 2 y tramo2: 75 m ³ x 2

Tabla 1. Obras que se realizaron en cada uno de los torrentes del monte público de la Montaña de Meranges

En las figuras siguientes se muestran las actuaciones realizadas en el torrente de las Canes y el detalle constructivo de las palizadas de madera:

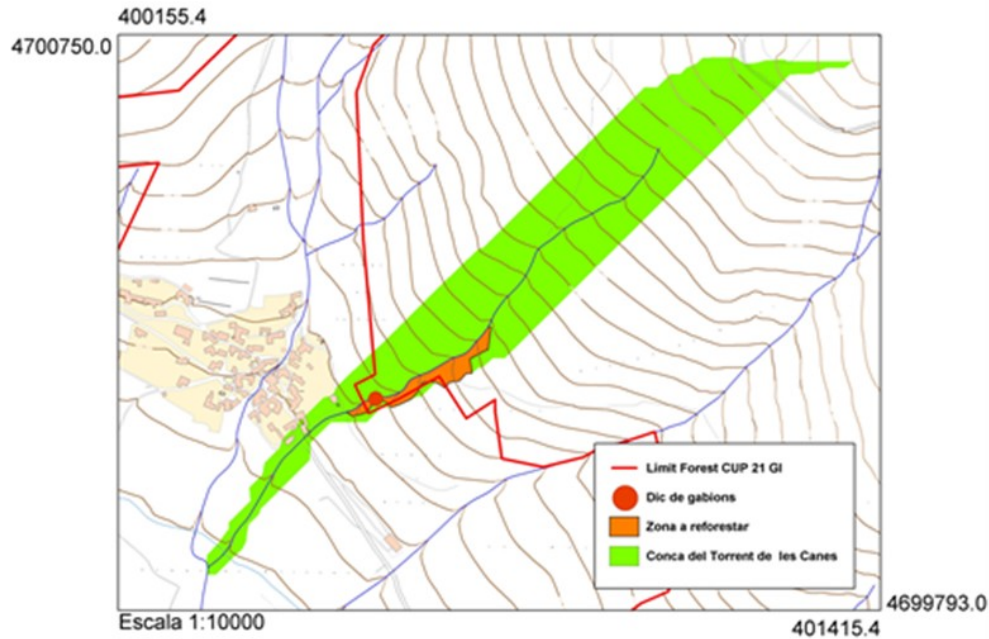


Figura 5. Mapa con la ubicación de los trabajos realizados al torrente de les Canes.

Las obras de bioingeniería que se realizaron en este torrente fueron la construcción de cuatro palizadas de madera con la revegetación de la zona. Aguas abajo de la construcción del dique de gaviones se construyeron, en el lecho del torrente, cuatro palizadas de madera para fijar la cota del lecho y evitar la formación de surcos profundos en este tramo. Para su ejecución se excavó una zanja perpendicular a la dirección del lecho del torrente. Se utilizaron troncos de madera tratada de 20 cm de diámetro que se clavaron verticalmente en el terreno hasta una profundidad de 1 m. En el paramento aguas arriba se colocaron en la zanja transversalmente troncos de madera tratada de 10 cm de diámetro mínimo. Esta estructura presenta una contra inclinación hacia aguas arriba de 10-15°. La altura efectiva de estas palizadas es de 0,6 m y su longitud varía en función de la anchura del lecho en cada tramo. Los troncos se unieron entre ellos con barras de acero corrugado de D= 10 mm. Aguas arriba se protegió la estructura con un geotextil. Aguas abajo se construyó un cuenco de disipación con piedras.

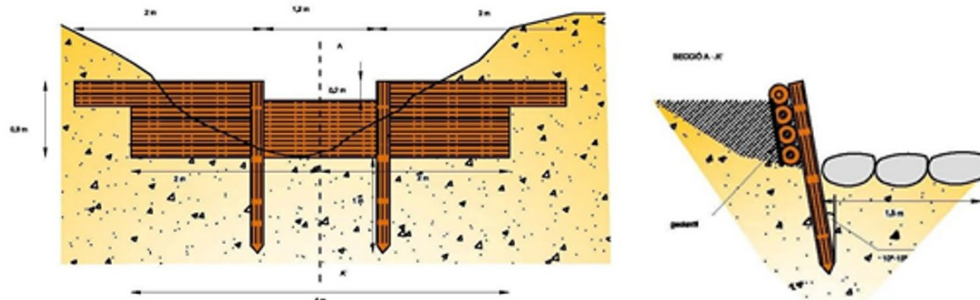


Figura 6. Detalle del alzado y el perfil de la palizada.

Toda la superficie entre las diferentes palizadas se reforestó con *Pinus sylvestris*, *Fraxinus excelsior*, *Populus nigra* y *Prunus avium* y se sembró con una mezcla de especies herbáceas.

A continuación, se muestra una imagen de la ejecución de las palizadas:



Figura 7. Foto de la primera palizada construida aguas abajo del dique de gaviones, antes de realizar la plantación y la siembra.

En las figuras siguientes se muestran las actuaciones realizadas en el torrente de Envalls y el detalle constructivo de los diques de consolidación y muros con estructura Krainer:

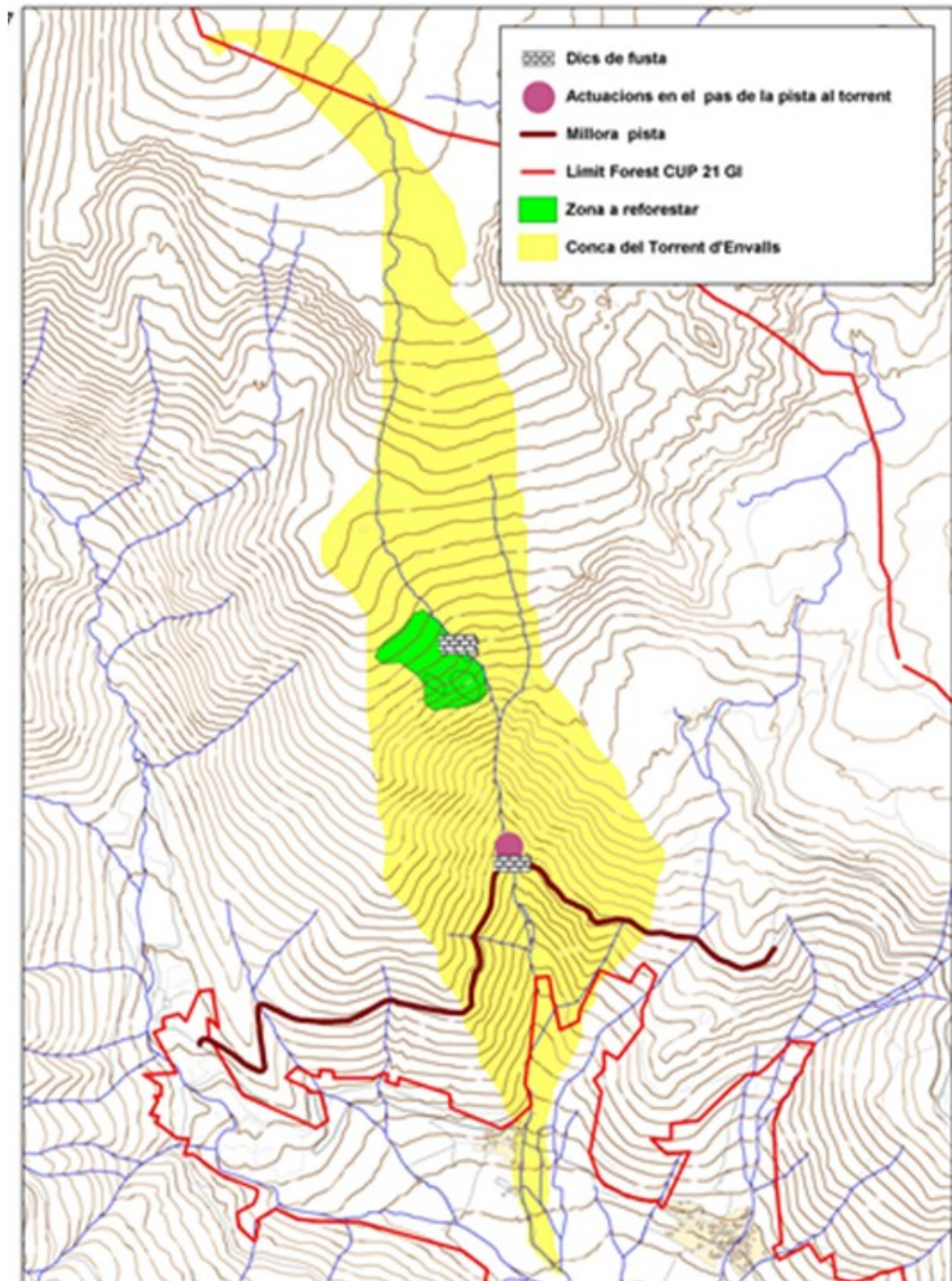


Figura 8. Mapa con la ubicación de los trabajos realizados al torrente de Envals.

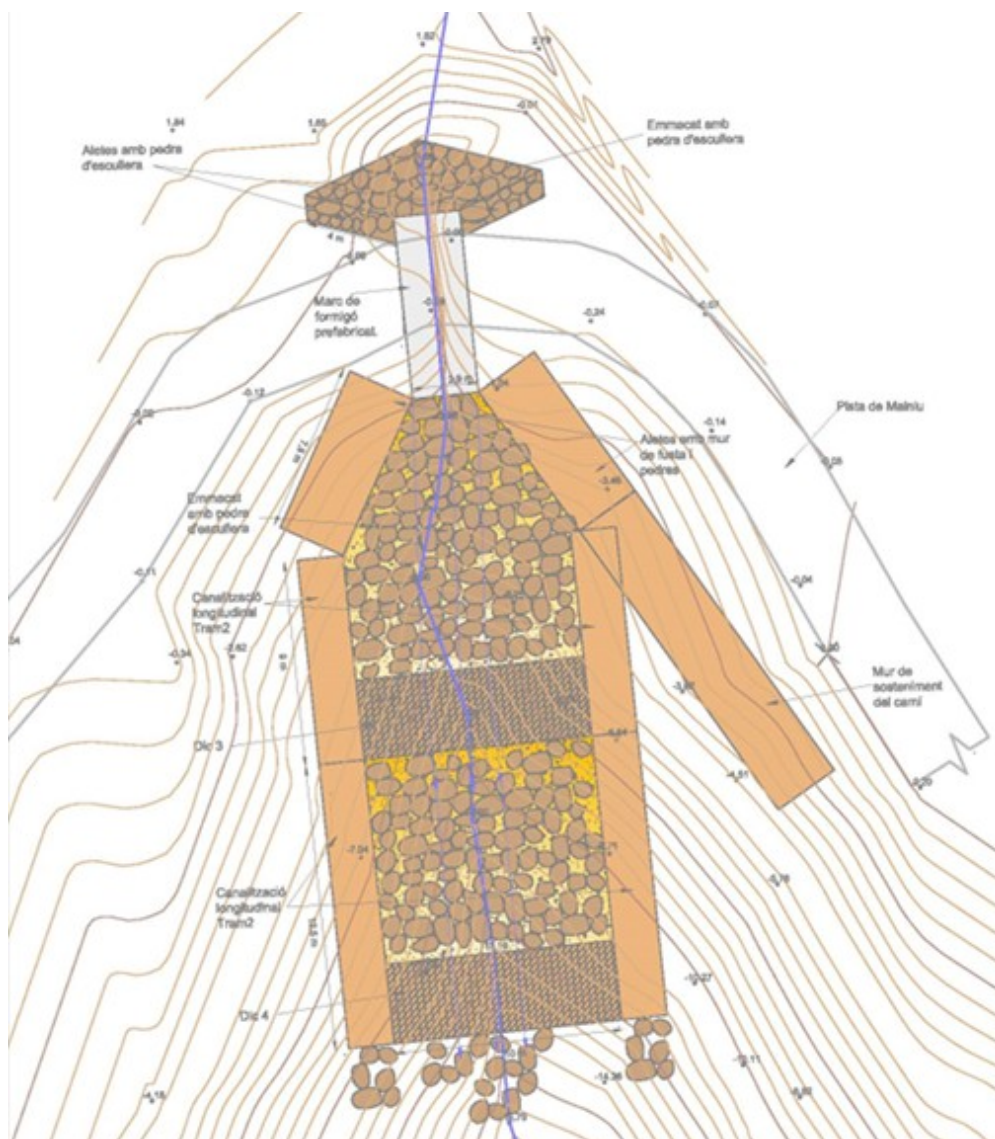


Figura 9. Detalle constructivo de los diques de consolidación y muros con estructura Krainer.

Se construyeron los diques de consolidación con una estructura tipo krainer de madera y piedra. El primer metro de la estructura está enterrado en el terreno constituyendo la cimentación del dique. El vertedero presenta forma trapezoidal con las paredes laterales con un ángulo de 45°. Se realizó la excavación en forma de zanja. La base de la excavación era plana o con un pequeño contrapendiente hacia aguas arriba del 4-10%. Para la construcción del dique se colocaron troncos de 1,5/3 m de longitud al fondo de la excavación, en dirección longitudinal dejando una distancia de 1 m entre ellos, estos tienen que estar en toda su longitud apoyados en el terreno. A continuación, se colocaron encima 2/3 troncos, en dirección transversal al curso del torrente, uno a cada extremo de los troncos de la base, dejando una distancia de 1,5 m. Estos se fijaron mediante una barra de acero corrugado de D=16 mm. Se colocó otra fila de troncos transversales y longitudinales sucesivamente hasta tener la altura de la cimentación. A medida que se iba construyendo la estructura se rellenaba con piedras de tal manera que quedasen los menores huecos posibles. Se colocaron las piedras más gruesas aguas abajo. El diámetro óptimo de las piedras del relleno es entre 15 y 20 cm. A continuación, se construyó del mismo modo el cuerpo del muro y finalmente se

construyeron las aletas. Aguas abajo de cada dique se construyó un cuenco de disipación con piedras de gran diámetro o un encachado de piedra.

Para la construcción de los dos diques krainer en el tramo inicial del torrente se utilizaron troncos de madera tratada y para la construcción de todas las estructuras krainer de la zona intermedia se utilizaron troncos de *Larix sp.* procedentes de la misma región de la Cerdaña francesa de diámetros de 20 cm o superiores.

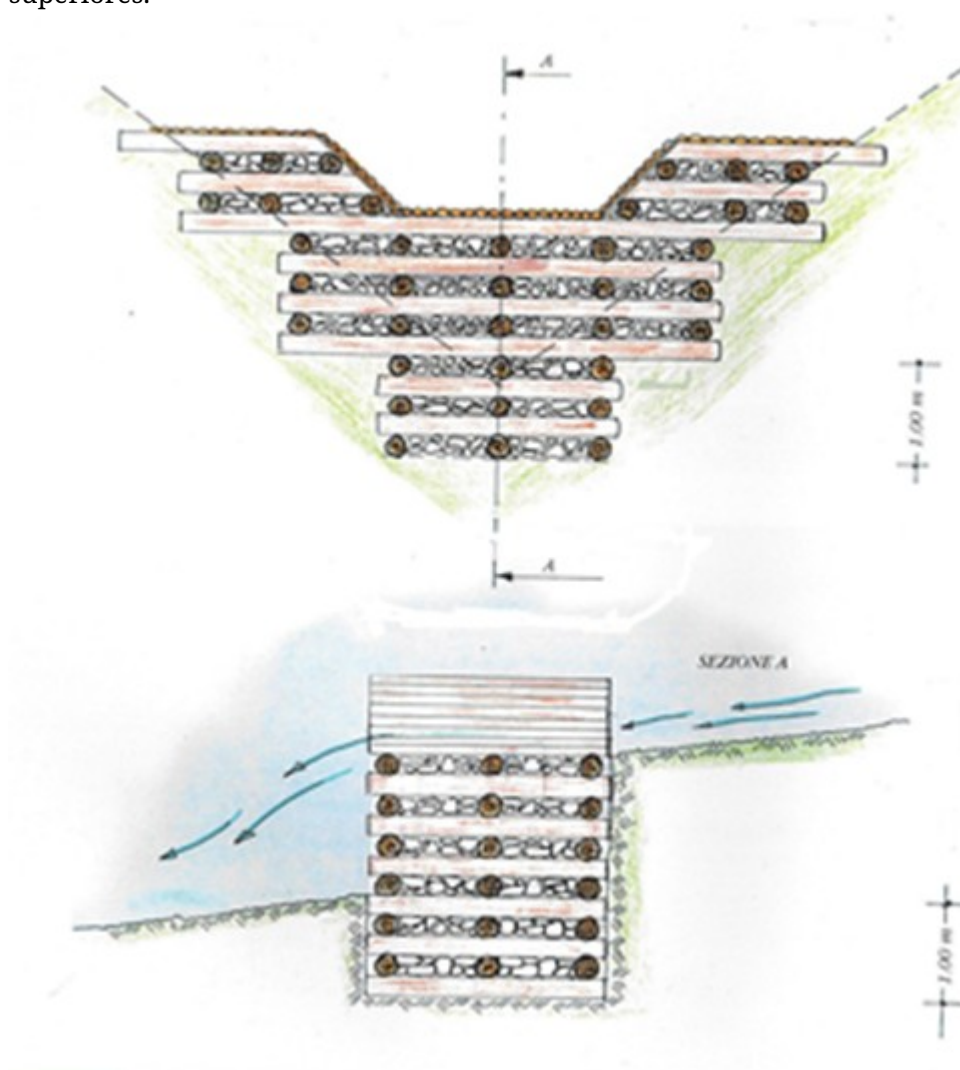


Figura 10: Dique de consolidación con estructura de madera y piedras (Fuente: REGIONE PIEMONTE 2003).

Se revegetó las estructuras colocando dos filas de estacas de material vivo, una en la base del muro y la otra a la fila de sobre el muro. Entre cada tronco transversal se colocaron estacas distanciadas 0,5 m. Las estacas eran de *Salix caprea* procedentes del mismo torrente. Se obtuvieron y plantaron en el periodo de parada vegetativa invernal cuando las estructuras ya estaban construidas. Se repoblaron también los taludes con la plantación de *Pinus sylvestre* de 2 savias.

Los muros de la embocadura aguas abajo y el muro de sostenimiento del talud inferior del camino también se construyeron de tipo krainer con troncos y piedras. Estos muros presentan una contra inclinación hacia el talud del 10% (6°). Las condiciones técnicas de construcción de estas estructuras y de los materiales son las mismas que las descritas para los diques de consolidación.

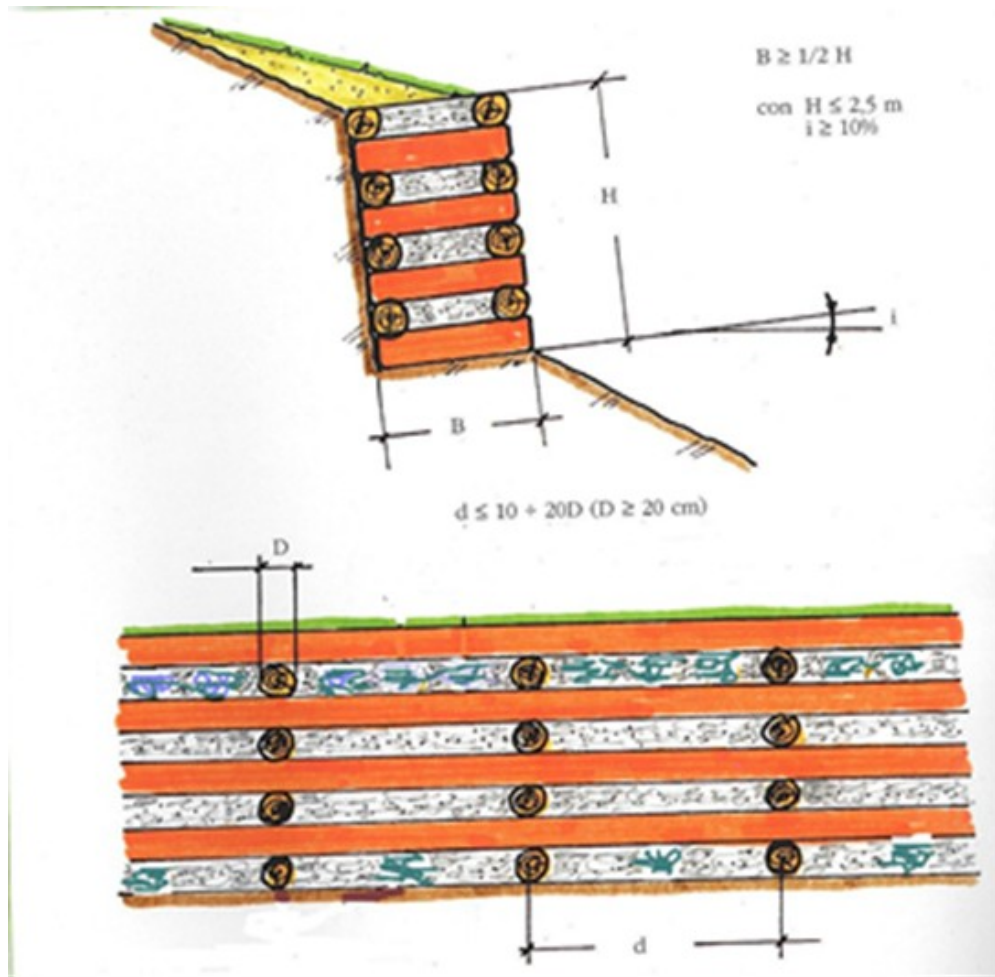


Figura 11: Detalle constructivo del muro con estructura de madera y piedras (Fuente: Regione Piemonte 2003).

A continuación, se muestran imágenes de la ejecución de la reforestación y la construcción de los diques:





Figura 12: Fotos de la ejecución de las obras de bioingeniería.

4.2 Actuaciones de emergencia restauración hidrológica en el incendio de

Calvinçà - Alt Urgell (2012)

Se realizaron una serie de actuaciones de emergencia para mitigar la gran pérdida de suelo existente tras un incendio en tres montes públicos donde se ubica la captación de agua potable de un pueblo.

El 8 de marzo del 2012 coincidió un episodio de viento con una masa de aire más cálida en el Pirineo catalán, lo cual hizo que el comportamiento del fuego se disparara tanto en longitud de llama, como en velocidad de propagación y en distancia de focos secundarios. Este día se declararon cuatro incendios forestales en el Pirineo de Lleida simultáneos y de difícil extinción por las fuertes rachas de viento y la inaccesibilidad del territorio. El incendio de Calvinçà (178.5 ha) afectó a tres montes públicos:

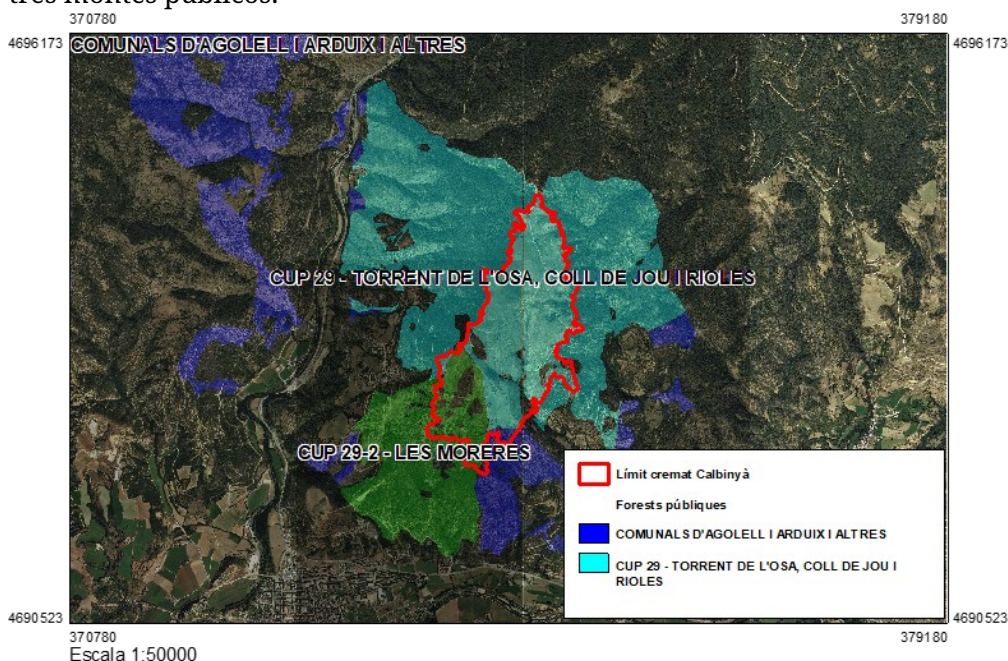


Figura 13. Ubicación de la zona quemada y de los montes públicos afectados.

El mes de enero del 2013 se llevaron a cabo unas obras urgentes de restauración hidrológica en el incendio de Calvinçà. Estas consistieron en la construcción de cuatro diques de consolidación y de retención en tres puntos del torrente principal, para retener los materiales erosionados en la zona quemada y ralentizar la socavación producida por la corriente en la red de drenaje. Estos diques se construyeron principalmente con la madera de los árboles quemados alrededor del torrente y con piedras de la zona. Se utilizaron también estacas de castaño para fijar la estructura.

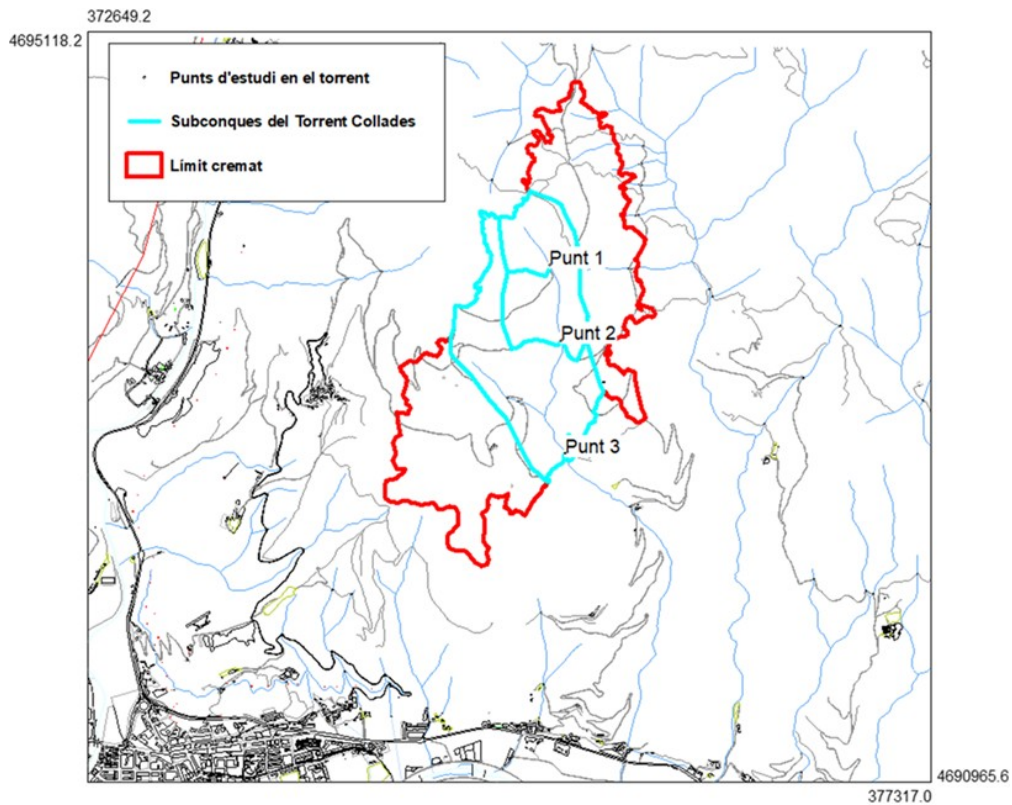


Figura 14. Ubicación de los tres puntos donde se construyeron los diques de retención de sedimentos.

Los detalles constructivos de los diques mixtos que se construyeron fueron los siguientes:

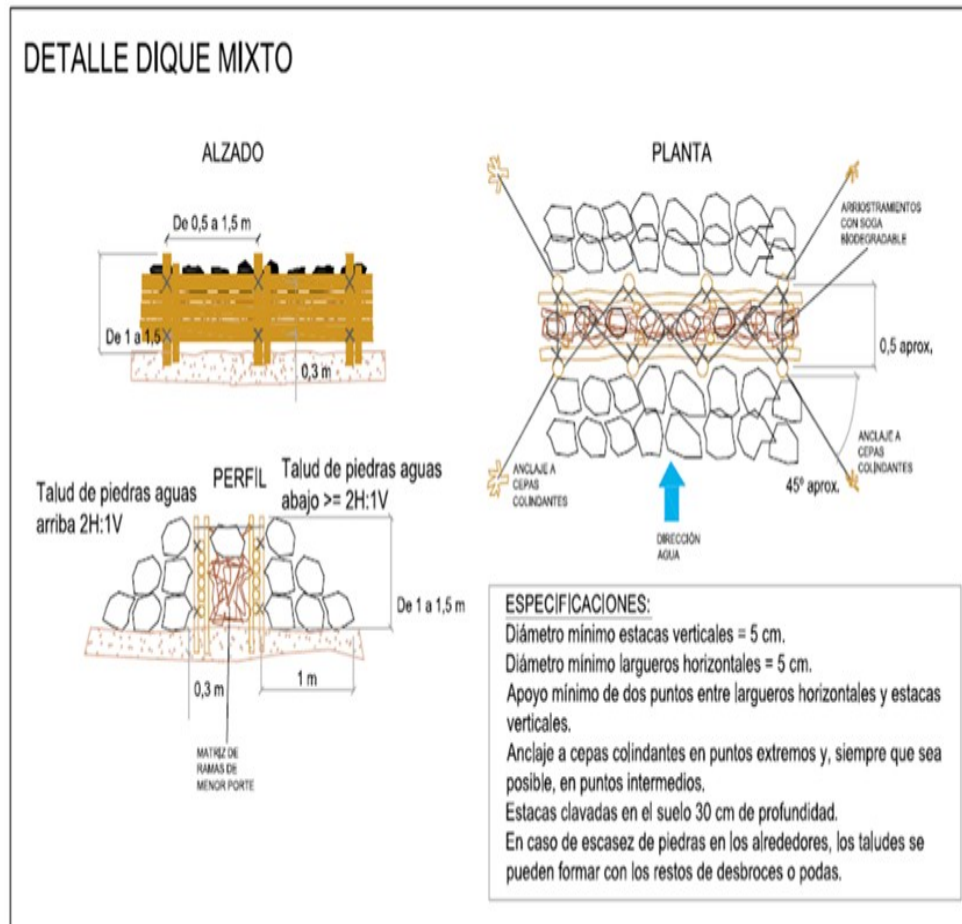


Figura 15. Detalle constructivo de los diques mixtos que se construyeron.

Estas obras se realizaron con medios propios de la administración forestal catalana. En las figuras siguientes se muestran imágenes de la construcción de estos diques:







Figura 16: Fotos de la ejecución de las obras de bioingeniería de emergencias.

4.3 Restauración daños provocados por la lluvia torrencial en los accesos Montaña Sant Miquel - Ripollès (2019)

Se llevó a cabo la obra de corrección del fenómeno torrencial en la intersección de la pista con el Torrent de Carboneros y la mejora de la pista en el punto afectado por las riadas combinando estructuras de bioingeniería con estructuras de ingeniería clásica.

Los días 14 y 15 de octubre de 2018 en el Pirineo catalán, en la comarca del Ripollès se produjo un episodio de inundaciones como consecuencia de precipitaciones de elevada intensidad, registrándose valores extremos de precipitación en menos de 24h en la zona. La elevada precipitación e intensidad, junto con el caudal sólido consecuencia de numerosos deslizamientos y otros fenómenos geológicos a lo largo de cuenca, colapsaron numerosas obras de puentes y pasos, así como inhabilitó la pista forestal de acceso al monte público de la Montaña de Sant Miquel.

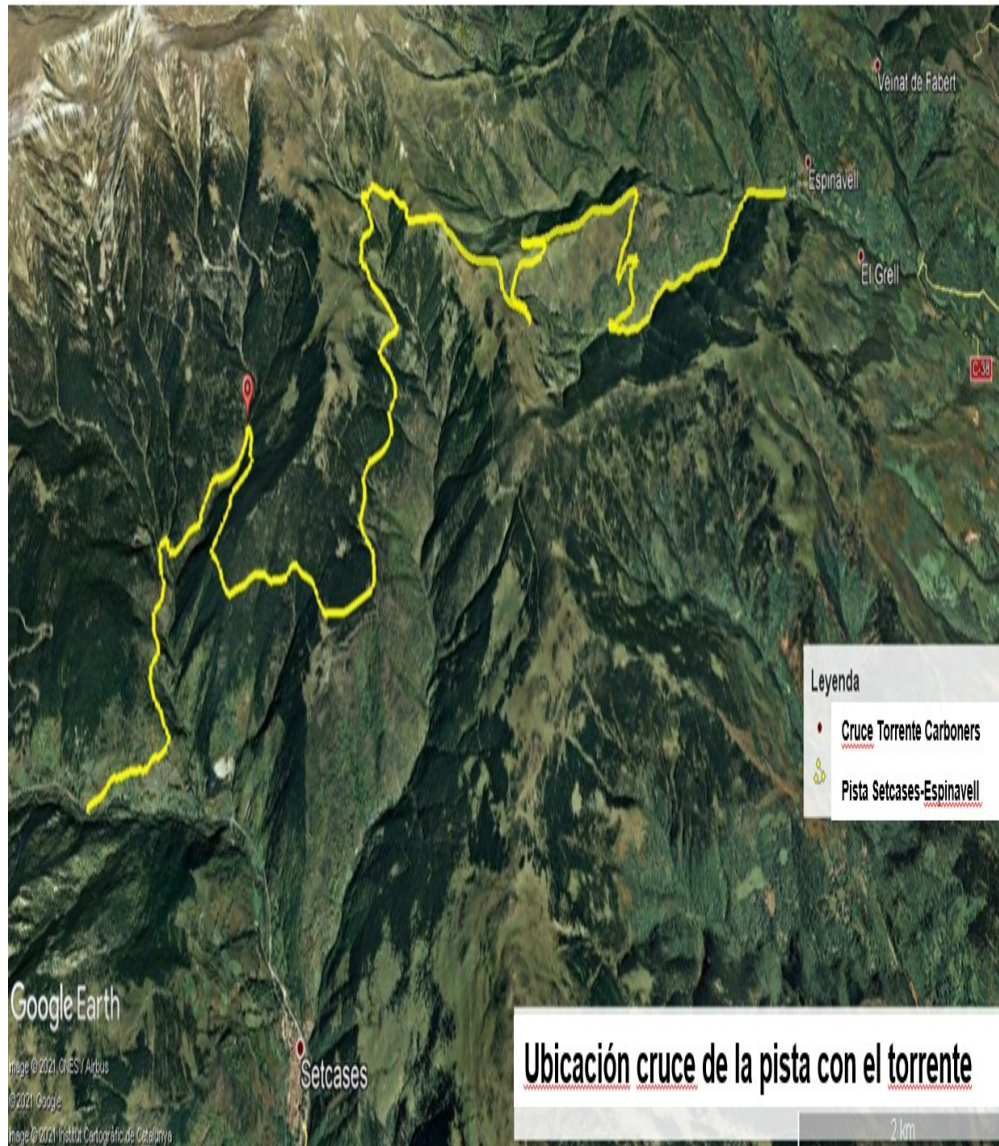


Figura 17. Pista de acceso al monte público de la Montaña de Sant Miquel.

Una de las obras afectadas fue el pequeño puente y el tramo de la pista aguas abajo de este.



Figura 18. Fotos de la pista de acceso al monte donde el flujo torrencial erosionó el lateral derecho de la obra de fábrica y el agua que circuló por la pista la erosionó generando una cicatriz de más de ocho metros de longitud y tres metros de profundidad.

Los objetivos específicos de esta obra fueron:

- Construcción de una nueva obra de paso en el cauce dimensionada para un caudal estimado de un periodo de retorno de 500 años:

- Eliminación del paso al cauce existente
- Aumento de la cota del camino
- Construcción de una nueva obra de drenaje transversal
- Mejora del camino:
 - Reconstrucción de la caja del camino
 - Mejora de los drenajes existentes
 - Estabilización del talud exterior del camino
 - Construcción de un nuevo drenaje transversal

En esta obra se combinaron estructuras de ingeniería clásica con técnicas de bioingeniería. Las obras que se realizaron fueron las siguientes:

Tabla 2. Obras en la pista de acceso al monte público de la Montaña de Sant Miquel.

ACTUACIÓN		MEDICIONES
2 líneas de marcos 2,5 x 2,5 m y 1 línea de marcos 2 x 1,5 m de 10 m de longitud		
1600 m		3
640 m		3
175 m		3
182 m		3
633 m		3
		4 ud
160 m		3

Se utilizaron materiales naturales de la zona para construir las aletas y los muros sobre los marco para tener una mayor integración a nivel de paisaje.

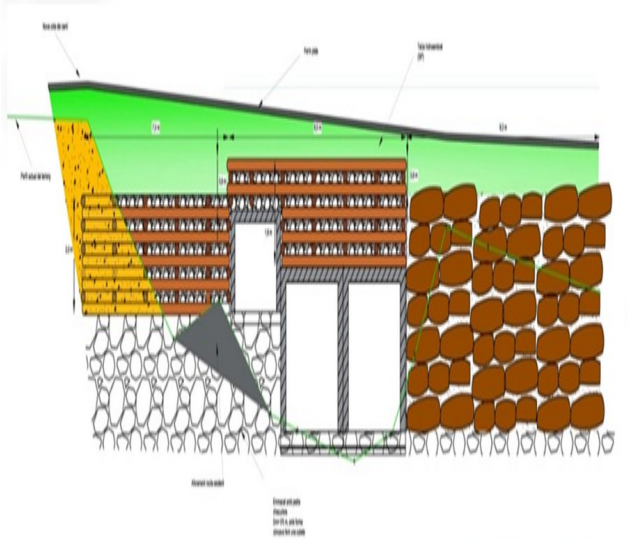
- Troncos de madera de Larix procedente del mismo monte de diámetros de 20 cm o superiores.
- Piedras de la zona para rellenar los muros krainer
- Piedras de escollera de la zona



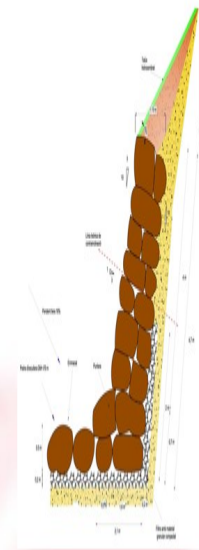
Figura 19. Fotos de los alerces plantados en el mismo monte público en la década de los 70 para la restauración hidrológico - forestal de la zona. La madera de alerce es muy durable en el tiempo, motivo por el cual se utiliza en obras de bioingeniería.

En la figura siguientes se muestran las actuaciones realizadas en el torrente y el detalle constructivo de los krainer:

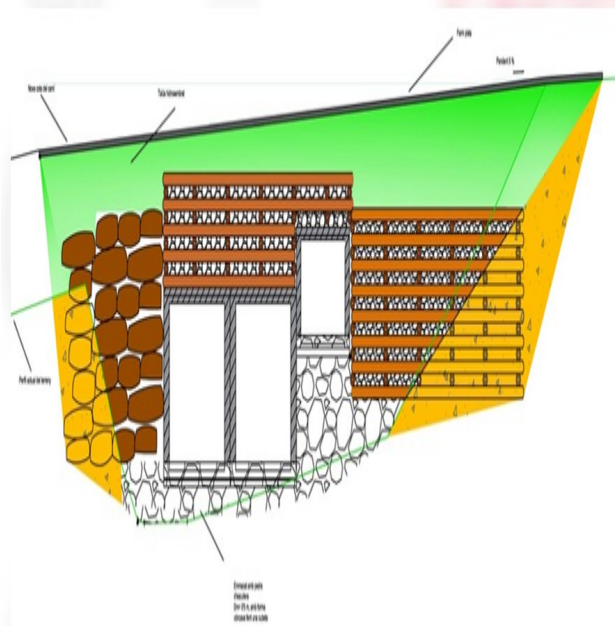
EMBOCADURA AGUAS ARRIBA



ALETAS MARGEN DERECHO



EMBOCADURA AGUAS ABAJO



MURO SOBRE LOS MARCOS

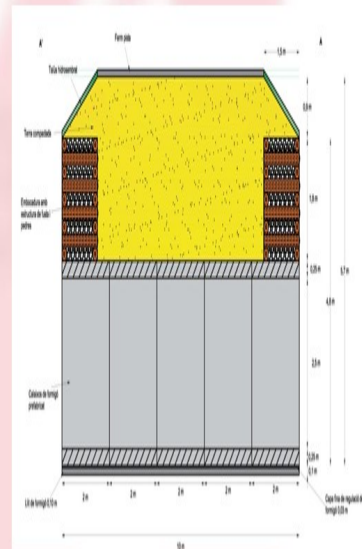


Figura 20. Construcción de un nuevo drenaje transversal.

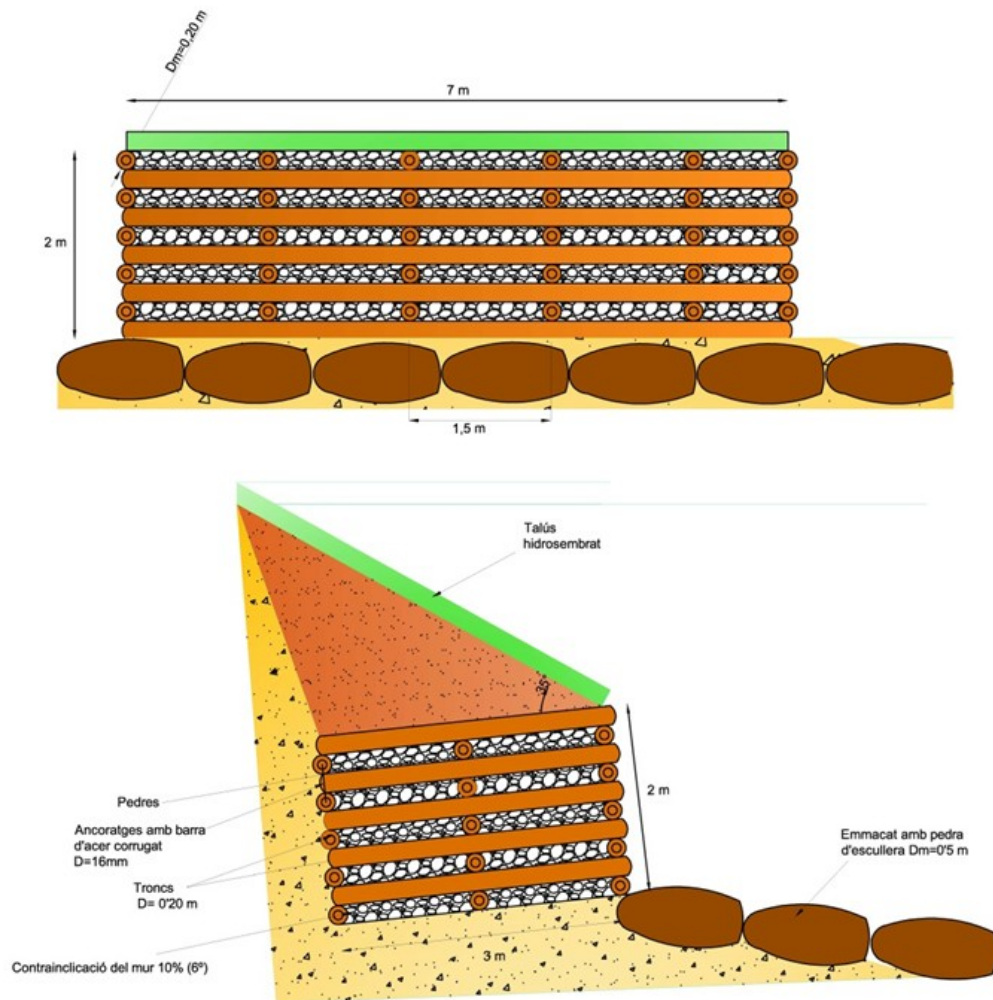


Figura 21. Detalles constructivos de los muros krainer.

En las figuras siguientes se muestran imágenes del proceso de construcción de las estructuras de bioingeniería de esta obra:





Figura 22: Fotos de la ejecución de las obras de bioingeniería.

4.4 Protección de márgenes del río Cardener a la altura de la Coma (fase 4) - Solsonés (2021)

Esta obra se localiza en un torrente con una cuenca que presenta una gran capacidad erosiva, con un sustrato con poca cohesión y una escasa cubierta vegetal. Las avenidas ordinarias van rebajando el nivel del cauce.

A la altura del núcleo de la Coma en la comarca del Solsonès del Pirineo catalán, las grandes avenidas del año 1982 depositaron acarreos procedentes de la cabecera. El cauce aumentó de cota invadiendo los campos de la zona de policía y llevándose incluso alguna casa. Posteriormente, un desprendimiento amenazó unas cuantas casas del margen derecho del torrente.

Desde entonces, las avenidas ordinarias van rebajando de nuevo el nivel del cauce. Varias obras de encauzamiento del margen, consistentes principalmente en umbrales de fondo, garantizan una protección eficaz de la parte urbana, si bien también han dejado más expuesto el margen derecho en todo este tramo.

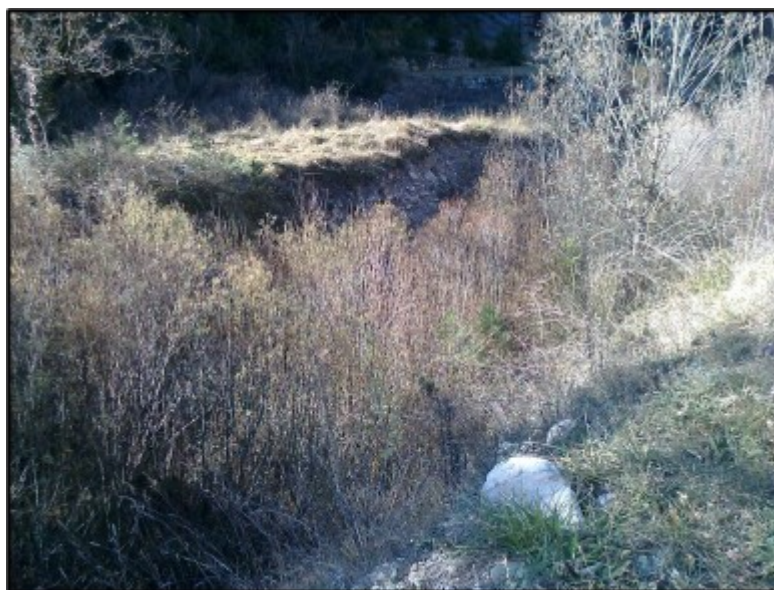


Figura 23: Foto de la desembocadura del torrente del margen derecho en el río Cardener y foto del margen izquierdo a continuación de la escollera existente.

El objeto de este proyecto es conseguir la estabilización de los márgenes del río Cardener a la altura del núcleo de la Coma en los tramos que actualmente no presentan protección y se ven desestabilizados. Así mismo se pretende mejorar el aspecto visual y biológico de estos tramos.

En esta obra se combinaron estructuras de ingeniería clásica con técnicas de bioingeniería. Las obras que se realizaron fueron las siguientes:

Tabla 3. Obras que se realizaron en el lecho y en la zona de dominio público hidráulico del río Cardener en su paso por el núcleo de la Coma:

ACTUACIÓN	MEDICIONES
3300 m	3
310,5 m	3
258 m	3
	358 m
18,6 m	3

El detalle constructivo de los diques de consolidación krainer, es el expuesto en la figura 10.

En las figuras siguientes se muestran imágenes del proceso de construcción de las estructuras de bioingeniería de esta obra:





Figura 24: Fotos de la ejecución de las obras de bioingeniería.

4.5 Obra de emergencia adecuación del cauce del río Gorg al Albi- les Garrigues (2021)

En octubre de 2019 una Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA) afectó a buena parte del territorio catalán, siendo el municipio de l'Albi en la comarca de las Garrigues uno de los más afectados de la provincia de Lleida. En el municipio las lluvias torrenciales arrastraron vehículos y produjeron importantes destrozos sobre las edificaciones más cercanas al cauce del río Gorg, llegando el nivel del agua a 1,5 m en el edificio del consistorio y convirtiendo parte de las calles en verdaderos torrentes. El principal problema radicaba en la falta de sección hidráulica del cauce del río en zona urbana, una canalización insuficiente apostillada por obras de paso como puentes de poca luz.

En el contexto de la restauración de los daños producidos por esta tormenta, la Agencia Catalana del Agua (ACA) tramitó un expediente de emergencia que abarcó tanto cuencas internas como compartidas del territorio catalán. La gran mayoría de trabajos realizados eran de restauración de la situación previa trabajando sobre los arrastres y para recuperar los cauces existentes y volver a poner en servicio las principales obras de paso de los diferentes cursos fluviales.

En el Albi se realizaron varias actuaciones, pero una de ellas destacó por su singularidad; en el tramo bajo del río Gorg se localizaba un cauce tan estrecho que



fue el que provocó el estancamiento del agua y la subida de los calados aguas arriba que inundó el pueblo. En este caso en la margen derecha nos encontrábamos con edificios urbanos e industriales mientras que en la margen izquierda se ubicaba una zona de huertos que separaba a los edificios del río unos 50 m. El cauce estaba consolidado con una escollera hormigonada que colapsó en muchos de sus puntos por las lluvias torrenciales, ya que los bolos eran de pequeño tamaño y el hormigón no pudo superar las tensiones de tracción existentes.

Se realizó un estudio de cuenca para analizar los caudales asociados a periodos de retorno de 500 años y el resultado fue que el cauce necesario era de 12 m de ancho por 3 de alto mientras el existente no superaba en ningún caso los 6 m de ancho y normalmente estaba alrededor de los 5 m. En el margen derecho, debido a la falta de espacio existente con las fincas urbanas colindantes al río, se volvió a reconstruir la escollera, en este caso sin hormigonar y utilizando el tamaño de bolo adecuado para las fuerzas de tracción asociadas a los caudales calculados. Se añadieron umbrales de fondo para seccionar el río en tramos erosionables con tamaños de piedra similares a los de la escollera de protección del talud.





Figura 25: Fotos de la escollera y de los umbrales de fondo contruidos con piedras de escollera sin hormigonar.

El cauce se ensanchó hasta los 12 metros necesarios y en el margen izquierdo se construyó un talud mediante una obra de bioingeniería que permitiría la implantación de la vegetación para crear un pequeño paseo fluvial en su coronación a la vez que este nuevo camino servía de acceso a los huertos existentes.

Se construyó un muro Krainer con rollizos de castaño (procedencia del macizo del Montseny) de 25 cm de diámetro y longitudes de 4 m para el avance en los tramos longitudinales al cauce y de 2,5 para los elementos perpendiculares al cauce y que a la postre quedarían enterrados formando el entramado de madera.



Figura 26: Foto de la construcción del muro krainer con troncos de castaño.

Se le dio un retranqueo en cada piso que se elevaba de manera que se creaba el espacio suficiente para disponer de superficie de plantación de arbustivas (especies de ribera), y en coronación se plantaron árboles de carácter ripícola. La longitud del muro krainer es de 150 m. Se fundamentó en una primera línea de escollera enterrada lateralmente a nivel de cauce y 2,5 m de altura más la mota de coronación.

Los trabajos se realizaron mediante una brigada con motosierras para hacer los encajes de los troncos, una perforadora para poder ubicar las barras metálicas de unión entre rollizos, la ayuda de una giratoria de cadenas para el movimiento de tierras y la de un camión grúa para asistir en la colocación de los diferentes elementos del muro. La duración de estos fue durante 2,5 meses permitiendo realizar la plantación en la época invernal de los años 20 y principios del 21.



Figura 26: Foto de la ejecución de las obras de bioingeniería.

5. Discusión

Se evalúa en qué fase está actualmente cada una de las cinco obras de

restauración hidrológico-forestal realizadas con técnicas de bioingeniería en montes públicos catalanes, se expone el diagnóstico del estado actual y si estas obras cumplen los objetivos por los que fueron realizadas.

Durante la vida de servicio de estas obras de bioingeniería, se han producido cambios debido principalmente a dos razones. Por un lado, van cambiando progresivamente las características de los materiales inertes biodegradables utilizados con el paso del tiempo (la resistencia mecánica de estos materiales disminuye). Por otro lado, la vegetación va desarrollando su parte aérea y subterránea aumentando con el tiempo su capacidad de refuerzo y estabilización del terreno (Tardío&MIckovski, 2016; Tardío et al.,2018).

5.1 Corrección hidrológica forestal a la Montaña de Meranges- Cerdanya (2009)

Se ha realizado el seguimiento de la evolución de la obra de bioingeniería durante 15 años, desde su ejecución hasta la actualidad.

La puesta en servicio de las 3 obras de bioingeniería ha sido totalmente satisfactoria. No se han observado síntomas de degradación de las estructuras ni de los materiales biodegradables más allá de grietas de 5- 6 mm en la superficie de los troncos tratados y en los de laricio.

La vegetación en las empalizadas se ha desarrollado perfectamente. La cobertura herbácea es del 100% y el 80 % de los árboles plantados han arraigado bien.





Figura 27: Foto de la evolución de las palizadas y de la vegetación.

La reforestación en la parte alta de la cuenca con pino negro no ha arraigado en las laderas del torrente estabilizadas con los diques de consolidación realizados con madera tratada. Los protectores se tumbaron tras las nevadas del invierno posterior a su colocación. Tampoco ha aumentado la cobertura herbácea natural en esta zona.



Figura 28: Foto de la evolución de los diques de consolidación y de la vegetación en la parte alta de la cuenca.

Se propone la revegetación de las laderas los de torrentes mediante tepes y la plantación de pino negro en la tierra acumulada por los diques aguas arriba.

La reforestación realizada fuera de la ladera de incisión del torrente sí que ha prosperado con un éxito del 40% de supervivencia de los árboles plantados.



Figura 29: Foto de la evolución de la vegetación en la parte alta de la cuenca.
La revegetación mediante estacas de sauce en los muros krainer de la canalización

lateral en la ejecución de la obra no prosperaron. Posteriormente el año 2012 con medios propios de la administración forestal se volvieron a plantar estacas de sauce en los muros laterales de la canalización y se plantó pino silvestre en los taludes inferiores de la pista, la cual si que ha tenido éxito. Tanto la parte aérea como la radicular de los sauces se ha desarrollado correctamente.







Figura 30: Foto de la evolución de los diques de consolidación, canalización lateral y de la vegetación aguas debajo de la nueva obra de paso al torrente.

La deposición de tierras en los encachados de piedra de escollera contruidos entre diques ha originado su revegetación. Actualmente la sección hidráulica de la canalización es suficiente y mantiene su funcionalidad. Los taludes inferiores de la obra de paso al torrente están estabilizados.



Figura 31: Foto de la evolución de la vegetación aguas debajo de la nueva obra de paso al torrente construida.

5.2 Actuaciones de emergencia restauración hidrológica en el quemado de Calvinyà - Alt Urgell (2012)

Se ha realizado el seguimiento de la evolución de la obra de bioingeniería durante 12 años, desde su ejecución hasta la actualidad.

La puesta en servicio de los 4 diques mixtos ha sido totalmente satisfactoria. No se

han observado síntomas de degradación de las estructuras ni de los materiales biodegradables más allá de degradación de los troncos de diámetro inferior a 8 cm que se colocaron en el paramento aguas abajo, los cuales no son estructurales.

En el año 2018 se llevó a cabo la reforestación de los rodales que presentaban una regeneración natural inferior a 400 pies/ha y sin una cobertura arbustiva y herbácea del al menos el 50%. También se llevó a cabo la construcción y mejora de caminos y la recuperación de una zona de pastos.

Los diques mixtos construidos han retenido sedimento fino en el paramento de aguas arriba. Actualmente no se observa movilización de sedimentos en los puntos donde se construyeron los diques mixtos.





Figura 32: Fotos del estado del dique mitxo y de la evolución de la vegetación .

5.3 Restauración daño provocado por la lluvia torrencial en los accesos Montaña Sant Miquel - Ripollès (2019)

Se ha realizado el seguimiento de la evolución de la obra de bioingeniería durante los 5 años posteriores a su ejecución.

El estado de las estructuras de los muros krainer es excelente y realizan plenamente la funcionalidad por la que fueron contruidos. No se observan grietas ni síntomas de degradación en la madera. El estado de la revegetación de los taludes es insuficiente. Seria necesario realizar la reforestación de los taludes en un periodo máximo de 5 años para tener la estructura radicular eficaz cuando empiece la degradación de la madera.





Figura 33: Foto de la evolución de las obras.

5.4 Protección de márgenes del río Cardener a la altura de la Coma (fase 4) - Solsonès (2021)

Las estructuras están realizando plenamente la funcionalidad por las que fueron construidas. La deposición de sedimentos entre diques es correcta. No se ha generado erosión entre la interfaz de las estructuras de bioingeniería y los taludes de tierra. No se observan síntomas de degradación en los troncos de castaño.

La revegetación natural de los taludes es escasa y se considera necesario realizar la reforestación de las estructuras y de los taludes. Para llevar a cabo la revegetación de los taludes será necesario disminuir su pendiente para mejorar su estabilidad.





Figura 34: Foto del estado actual de las obras.

5.5 Obra de emergencia adecuación del cauce del río Gorg al Albillo Garrigues (2020)

Las estructuras de bioingeniería construidas están realizando plenamente la funcionalidad por las que fueron construidas. No se ha generado erosión entre la interfaz de las estructuras de bioingeniería y los taludes de tierra. Se están realizando riegos de soporte al arbolado para asegurar su supervivencia.

La revegetación natural de los taludes es escasa y se considera necesario realizar la reforestación de las estructuras y de los taludes, así como de la escollera.

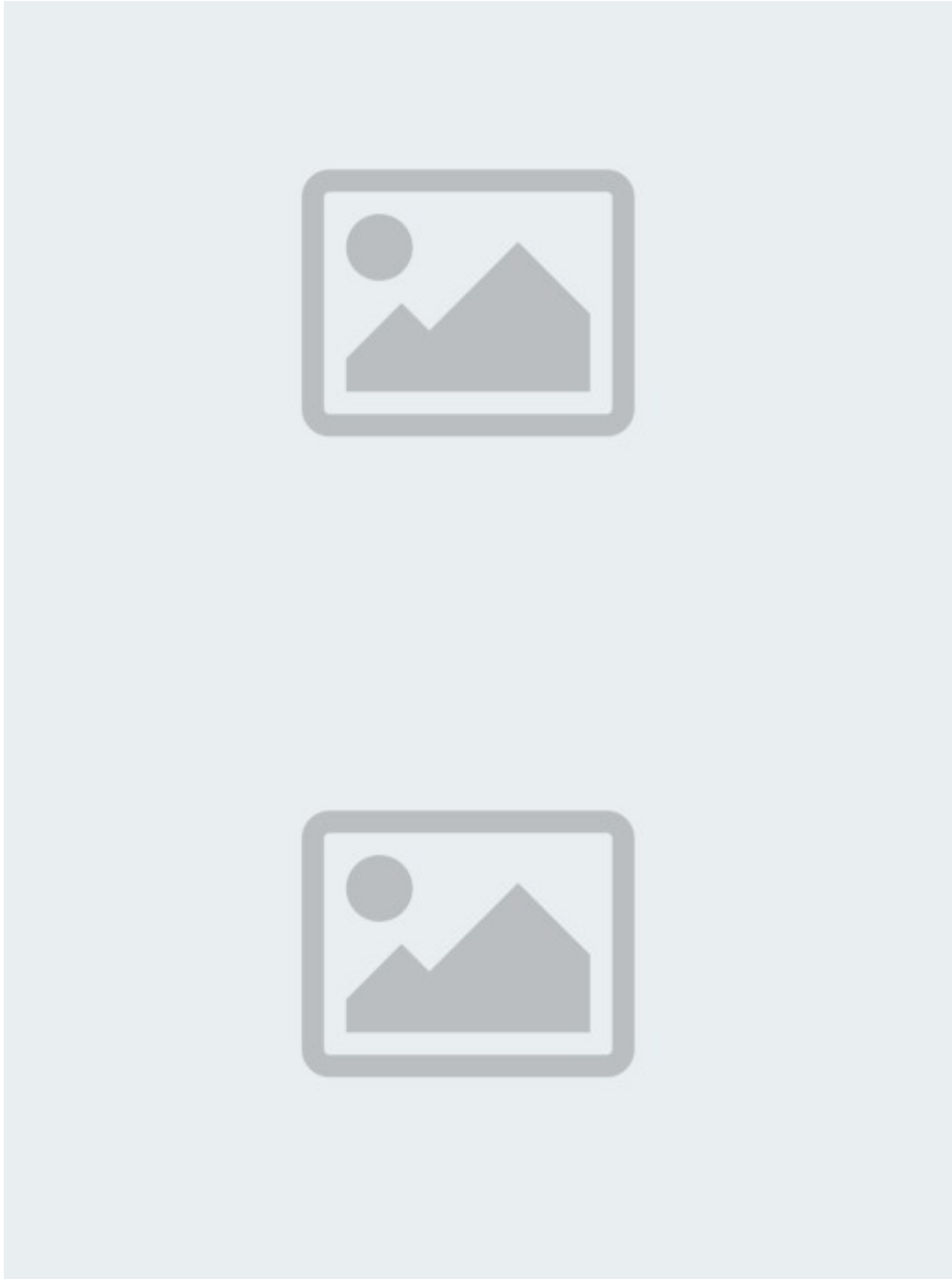


Figura 35: Foto del estado de las obras.

6.Conclusiones

El diseño y la ejecución de obras de ingeniería en la restauración hidrológico forestal en los últimos quince años en el Pirineo Catalán, ha permitido acumular una experiencia de la que se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Las obras de bioingeniería son una herramienta óptima para dar cumplimiento a los requerimientos normativos de restauración de la naturaleza, presentando una integración en el medio natural mucho más rápida que en obras con otros materiales. Esto las hace especialmente aplicables en entornos con requerimientos de protección ambiental o en zonas con alta sensibilidad social
2. Las obras estructurales de bioingeniería realizadas, continúan siendo



funcionales y prestando servicio hasta quince años después de su ejecución. Un factor esencial, además del correcto dimensionamiento de las estructuras, es la elección de los materiales vegetales a utilizar. En las obras analizadas tanto el larix como el castaño han demostrado su eficacia y durabilidad.

3. Otro factor básico para la elección de este tipo de estructuras y que optimiza su ejecución, es la existencia de los materiales a utilizar en un radio de acción cercano a las obras. Esto es especialmente aplicable en el caso de obras de emergencia, donde estas técnicas pueden proporcionar un recurso rápido y efectivo.
4. Las actuaciones de consolidación mediante revegetación, a pesar de su falta de efectividad inmediata, conviene planificarlas como futura contribución alternativa ante posibles deterioros de las obras estructurales. Estas actuaciones requieren de un seguimiento intensivo durante los años posteriores a la ejecución y de la previsión de partidas presupuestarias para su más que probable necesidad reposición. Estas actuaciones de revegetación presentan la dificultad añadida de que trabajan con material vivo que no siempre está disponible y hay que contar, en el contexto climático actual, con la dificultad de encontrar condiciones meteorológicas idóneas para su buen arraigo y supervivencia.
5. Tanto las empresas de trabajos forestales como las de obra civil, que habitualmente no están especializadas en utilizar técnicas de bioingeniería, son reticentes a la utilización y aprendizaje de estas metodologías. Por otro lado, en aquellas obras que utilizan materiales no homologados o normalizados, es especialmente importante la recepción de los materiales y el control de calidad. Estas circunstancias exigen por parte de la dirección de obra un seguimiento y dedicación de tiempo superior que en obras de estructuras tradicionales

7. Bibliografía

RAUCH, H. P., et al. Ecological challenges for the use of soil and water bioengineering techniques in river and coastal engineering projects. *Ecological Engineering*, 2022, 176: 106539.

REGIONE PIEMONTE; 2003 Interventi di sistemazione del territorio cono tecniche di Ingegneria Naturalistica.

SYMMANK, LARS, et al. The impact of bioengineering techniques for riverbank protection on ecosystem services of riparian zones. *Ecological Engineering*, 2020, 158: 106040.

TARDÍO, G. & MICKOVSKI, S. B., 2016. Implementation of eco-engineering design into existing slope stability design practices. *J. Ecol. Eng.* 92, 138–147.

TARDÍO, G., MICKOVSKI, S.B., RAUCH, H.P. & FERNANDES, J.P., ACHARYA, M.S., 2018. The use of bamboo for erosion control and slope stabilization: Soil Bioengineering Works. In: Khalil, H.P.S. Abdul (Ed.), *Bamboo - Current and Future Prospects*, 105-132; intechopen, London, ISBN 978-1-78923-231-8