

Guía de actuación

Mitigación del impacto del cambio climático en alta montaña Pirenaica

Control de la erosión hídrica mediante soluciones
basadas en la naturaleza





Contenido

1. ¿Por qué esta guía?	5
2. ¿Qué proponemos? Alcance de la propuesta. Antecedentes.	7
3. Factores clave para el control de la erosión.	11
3.1. Rápida revegetación	11
3.2. Pilotaje de la vegetación hacia la sucesión vegetal "clímax" del ecosistema local	11
4. Diagnóstico del entorno a restaurar.	13
5. Redacción del proyecto y dirección de obra.	15
6. Ovinorremediación	19
6.1. Rápida revegetación	19
6.2. Regularización de regueros y cárcavas mediante pisoteo ovino	20
6.3. Fertilización de la zona a sembrar mediante redileo nocturno	22
6.4. Posibles problemas y eventuales soluciones	25
7. Microdiques de ramaje para el control de lavas torrenciales	29
7.1. Objetivo	29
7.2. Procedimiento	30
7.3. Resultados	31
7.4. Posibles problemas y eventuales soluciones	32
8. Revegetación	35
8.1. Introducción	35
8.2. Selección de especies. Dosis de siembra	35
8.3. Diseño de la revegetación razonando en base a plantas/m ² . Método Claror	36
8.4. Propuesta-ejemplo de revegetación específica para control de la erosión en altitud para los Pirineos	37
8.4.1. Elección de la comunidad vegetal objetivo	37
8.4.2. Recolección y preparación de la semilla	39
8.4.3. Ensayo previo de potencia germinativa en condiciones de campo (G)	40
8.4.4. Siembra. Diseño y aplicación	41
8.4.5. Posibles problemas y eventuales soluciones. Aprendizaje	43
8.5. Seguimiento y pilotaje de los trabajos de revegetación	50
9. Prueba en blanco	53



1. ¿Por qué esta guía?

Los principales riesgos naturales de la región del SUDOE tienen una estrecha relación con el clima, ya que sus desencadenantes suelen ser fenómenos meteorológicos cuya frecuencia e intensidad están cambiando debido al cambio climático (CC). En el ciclo de gestión de catástrofes naturales (preparación-respuesta-recuperación-mitigación), cada euro gastado en prevención en países miembros de la UE, ahorra entre 4 y 7 euros en la gestión posterior a la catástrofe, siendo las pérdidas económicas promedio de unos 12.000 M € anuales (Sebastien Chauvin, 2021, com. per.).

La erosión hídrica superficial es un fenómeno natural con consecuencias preocupantes en muchas regiones del mundo. El control de la erosión de las aguas superficiales es, por tanto, un reto importante en las zonas donde están en juego cuestiones socioeconómicas.

Cuatro enfoques independientes y casualmente sinérgicos justifican la adopción de políticas que promuevan la aplicación de esta guía de actuación para el control de la erosión en la alta montaña Pirenaica, para cuando se produzcan lluvias torrenciales, deslizamientos, o movimientos de tierras que dejen expuestos en superficie materiales terrígenos estériles fácilmente erosionables.

A. Reducción de riesgos:

- a. Control de la erosión en cabecera de cuenca.
- b. Limitación de la producción y alcance de lavas torrenciales (debris flow).
- c. Reducción de la aportación de sedimentos en los lechos de torrentes y ríos del fondo de valle que, sin medidas correctoras, podrían acabar desbordando o necesitando dragados frecuentes.
- d. Reducción del riesgo y los daños de los aludes de fondo.

B. Servicios ecosistémicos:

- a. Mayor infiltración de agua, que supone más disponibilidad y calidad para el ecosistema y para los recursos hídricos (potable, riego, hidroelectricidad).
- b. Conversión de suelo estéril a fértil por incorporación de materia orgánica.
- c. Mejora paisajística por recubrimiento vegetal.
- d. Incremento de la disponibilidad de pasto para fauna salvaje y ganado.
- e. Mejora de la aceptación social en referencia a las ayudas públicas a la ganadería por los servicios ecosistémicos prestados en la restauración.

C. Mitigación de los efectos del CC: La estrategia propuesta para el control de la erosión mediante soluciones basadas en la naturaleza (NBS por sus siglas en inglés), tiene potencial para fijar grandes cantidades de CO₂ atmosférico. Por tanto, en muchos casos, el coste de la restauración podría autofinanciarse en una proporción importante del monto total en base a créditos de carbono.

D. Rentabilidad económica: El margen de ahorro en prevención y gestión de riesgos naturales es muy considerable en comparación con las inversiones necesarias para la mitigación. **Pocas inversiones empresariales tienen retornos tan espectaculares (V.A.N. > 400% de la inversión inicial)**, ello sin considerar la posibilidad de autofinanciación mediante créditos de carbono, ni los servicios ecosistémicos y paisajísticos que las NBS aportan.

Resulta por tanto urgente que los responsables del espacio público de alta montaña pongan a disposición de los gestores un marco estratégico transnacional para reforzar la resiliencia de los territorios del SUDOE (Suroeste de Europa), y que, mediante líneas de financiación, de investigación, asesoramiento técnico, y facilidades administrativas, no se desaprovechen estas sinergias.

El incremento de probabilidad de ocurrencia previsto para las precipitaciones extremas en los Pirineos que comportará el CC tendrá como consecuencia un incremento del caudal de torrentes y ríos para un determinado período de retorno (T) respecto de los actuales valores considerados en el diseño de las infraestructuras hidráulicas, invalidando su actual diseño por reducción del nivel de seguridad y la vida útil de las infraestructuras (puentes, canalizaciones urbanas de ríos, diques de laminación de avenidas, captaciones de agua, presas, embalses, etc.). Ello a causa de que la metodología de cálculo del T, se basa en la utilización de datos históricos de precipitaciones extremas para predecir probabilidades de ocurrencia futuras bajo la hipótesis de clima regional estable, hipótesis que los recientes estudios del IPCC han demostrado obsoleta por CC. A su vez, este incremento de precipitaciones extremas en un ambiente de mayor sequía, va a truncar el actual equilibrio erosión-transporte-sedimentación, lo que **comportará un mayor aporte de sedimentos no previsto a los cursos de torrentes y ríos, parte de los cuales no podrán ser evacuados por el cauce actual, acumulando sedimentos y facilitando por tanto el desbordamiento en determinadas zonas, especialmente en cabecera de los conos de deyección. En definitiva, incrementando la peligrosidad y el riesgo de inundación en los valles pirenaicos.**

Por razones geomorfológicas y climáticas, en los Pirineos, las lavas torrenciales por lo general habían quedado relegadas de forma residual a las vertientes de mayor altitud. **El incremento del riesgo de precipitaciones extremas y de pérdida de cobertura vegetal en altitud por incremento de temperaturas y sequías extremas, facilitará que las lavas torrenciales puedan volver a llegar a los fondos de valle, a las captaciones superficiales de agua potable o riego, y en algunos casos hasta las zonas habitadas, en donde las actuales infraestructuras hidráulicas, por lo general, no están diseñadas para soportar el paso de las destructivas lavas torrenciales.** Otro incremento del riesgo y de la vulnerabilidad al que las autoridades también deberían prestar atención. Mediante esta guía, proponemos algunas estrategias basadas en NBS para mitigar sus efectos

2. ¿Qué proponemos? Alcance de la propuesta. Antecedentes

En ningún caso se pretende que esta guía de actuación compita con la bibliografía especializada para el control de la erosión y para la revegetación de espacios degradados en altitud. Se da por hecho que el eventual usuario de la guía, que pretende su aplicación práctica, conoce las técnicas comúnmente usadas en ingeniería de restauración ambiental. El lector no experimentado e interesado en la materia, podrá adquirir los conocimientos de base necesarios en la bibliografía especializada siguiente, ello sin la pretensión de desmerecer a otros textos igualmente válidos:

- Dinger F., 1997, Végétalisation des espaces dégradés en altitude. Ed. Cemagref, Grenoble, 144 p.
- Dupin B., Malaval S., Couëron G., Cambecèdes J. et Largier G., 2019, Restauration écologique des prairies et de pelouses pyrénéennes. Une guide technique pour régénérer les sols et les végétations dégradés en montagne. Conservatoire botanique national des Pyrénées et de Midi- Pyrénées, 153 p.
- López Cárdenas de Llano F. et al, 1998, Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Ed. Tragsa, Tragsatec, Ministerio de Medio Ambiente, Ediciones Mundi-Prensa, 945 p.
- López Jimeno C., 1999, Manual de estabilización y revegetación de taludes. Ed. López Jimeno Carlos, 704 p.

Los dos últimos textos propuestos, especialmente el penúltimo, serían más bien de consulta específica para la resolución de casos concretos de cierta complejidad de cálculo.

Pretendemos que la guía tenga un carácter eminentemente práctico para que, llegado el caso, sea directamente aplicable por técnicos en restauración ambiental que deban enfrentarse a una catástrofe natural, para la que con carácter de urgencia deban tomar medidas para mitigar los problemas acaecidos por un cambio repentino en las condiciones de erosionabilidad de la parte superior de una cabecera de cuenca Pirenaica en la que haya desaparecido total o



parcialmente el manto vegetal protector. **También, por qué no, para zonas desnudas existentes de antiguos deslizamientos de terreno, de pistas de esquí, o de taludes de carretera, entre otros que, aunque no estén dando problemas mayores en la actualidad, representen una situación de riesgo y se deseen restaurar.**

La propuesta se hace como recopilatorio técnico adaptado al caso desde la experiencia profesional en control de la erosión y revegetación de *SILVAGRINA* (empresa de ingeniería agronómica y forestal andorrana), incidiendo solo en aquellos aspectos prácticos clave que a nuestro conocimiento no están suficientemente tratados, en la bibliografía existente. No obstante, el grueso del contenido expuesto proviene de la experiencia adquirida entre 2015 y 2016, en que la empresa fue contratada para buscar medidas correctoras urgentes a los daños provocados por una gran tormenta acaecida en el altiplano de Claror (2.600 m s.n.m.) sito en Sant Julià de Lòria (Andorra), de 71 mm/h de intensidad horaria máxima, que produjo fenómenos erosivos intensos en cabecera de cuenca, dando lugar a la formación de lavas torrenciales, las que por una vertiente alcanzaron el fondo de valle (riu Gran Valira) en Sant Julià de Lòria, y por la otra vertiente acabaron generando turbideces extremas (>500 NTU) que inutilizaron la estación de tratamiento de agua potable (ETAP) de la parroquia de Les Escaldes-Engordany (15.000 habitantes), provocando cortes en el subministro de diversos días de duración. Una vez fragilizado el terreno, los problemas se repitieron en diversas ocasiones puesto que, con el material erosionado recientemente expuesto, tormentas de tan solo 15 mm obligaban a cortar la captación superficial de agua potable por turbidez excesiva, lo que evidenció la necesidad de consolidar los sedimentos acumulados y de frenar en las vertientes superiores el proceso erosivo de las cárcavas que confluyen en el nacimiento del arroyo de Claror, todo ello con el objetivo de reducir la magnitud y la frecuencia de episodios erosivos posteriores.



Por el hecho de que la zona afectada se encuentra dentro de un paisaje cultural del Patrimonio Mundial según la Organización de las Naciones Unidas por la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), el valle del Madriu-Perafita-Claror es una zona donde las intervenciones antrópicas debían ser mínimas, y siempre respetando el paisaje, los recursos naturales y culturales del valle. Para lograr el objetivo de estabilizar los sedimentos y reducir los episodios erosivos de la forma más sostenible posible, la empresa andorrana de ingeniería SILVAGRINA (proyecto y dirección de obra) trabajó en colaboración con los técnicos del Departamento de Agricultura y del centro de investigación CENMA de Andorra (actualmente Andorra Recerca +Innovació, AR+I), de manera que nos esforzamos en buscar soluciones de restauración ambiental basadas en la naturaleza, que más adelante expondremos. La mayor parte de las estrategias empleadas fueron originales (no supimos encontrar antecedentes bibliográficos), con la fortuna de que funcionaron en su mayor parte, y las publicamos en la revista del CENMA núm. 9: <https://www.iea.ad/images/CENMA/revista/09/11.pdf>.

En complemento, se expuso el artículo en algunos seminarios y jornadas técnicas, lo que atrajo la atención de MONTCLIMA quien licitó la realización de ensayos experimentales con el objetivo de avanzar en la comprensión de las acciones de estabilización y revegetación de terrenos montañosos, con la intención de que los resultados de esta restauración fuesen de utilidad en el futuro para desarrollar protocolos o estrategias para restaurar áreas de montañas dañadas por estos fenómenos.



3. Factores clave para el control de la erosión

3.1 Rápida revegetación

En alta montaña (pisos subalpino y alpino), el abrupto relieve y las condiciones ambientales menos favorables para el desarrollo de la vegetación, convierte a estas zonas en especialmente propensas a los fenómenos erosivos. La presencia de la cubierta vegetal es fundamental, ya que protege al suelo contra la erosión de las aguas superficiales. De hecho, la cubierta herbácea proporciona protección contra el impacto directo de las gotas de lluvia en el suelo (erosión por salpicadura), crea una mejor cohesión del suelo gracias a las raíces y la materia orgánica que incorpora, las hojas y los tallos de las herbáceas aumentan la rugosidad hidráulica, reduciendo la velocidad del flujo superficial y en consecuencia la capacidad de arrastre de tierra, a la vez que actúan como filtro y, por tanto, tienden a limitar en gran medida la erosión laminar difusa.

Se conoce que **la erosión del suelo desnudo es por lo menos 100 veces mayor que la del mismo suelo cuando éste está totalmente cubierto de vegetación herbácea, *ceteris paribus***. Ello según el factor cubierta (C) de la ecuación universal revisada de pérdidas del suelo (RUSLE). Esta grandísima diferencia, que según algunos investigadores llega a alcanzar valores incluso superiores a 300 veces (recubrimiento herbáceas >95%), es el factor clave de la propuesta. Por eso, entendemos que **el control de la erosión implica necesariamente fomentar la rápida revegetación de las zonas erosionadas y allí donde se han depositado los sedimentos**.

3.2 Pilotaje de la vegetación hacia la sucesión vegetal “clímax” del ecosistema local.

No basta con conseguir implantar rápidamente una cubierta vegetal. El objetivo consiste en que ésta sea estable y adaptada a la biocenosis que se pretende restaurar. Son frecuentes los fracasos, sobre todo en pistas de esquí y en taludes de carretera, donde mediante hidrosiembra, durante el primer ciclo vegetativo se consigue un buen recubrimiento usando especies



comerciales (domesticadas), no locales y de rápido crecimiento, pero que, en el segundo o tercer año, por falta de mantenimiento y de adaptación al medio, estos espacios con demasiada frecuencia quedan prácticamente desnudos de vegetación, perdiendo la inversión inicial a la vez que la capa superficial del suelo, dificultando todavía más la vegetalización permanente. De hecho, en algunas de estas zonas a las que nos referimos, especialmente si hay pastoreo libre, 20 o 30 años después de los movimientos de tierras y siembras correspondientes, continúan todavía yermas, con recubrimientos de flora autóctona inferiores al 5%. El fracaso generalmente es multicausal, pero el principal motivo es la no utilización de semilla local, adaptada al biotopo de referencia.

Aunque es preferible una siembra con semilla local por motivos ecológicos y de rentabilidad a largo plazo, es factible que una siembra realizada exclusivamente con semilla comercial, sea exitosa. Ahora bien, en este caso debe pilotarse el mantenimiento a largo plazo con resiembras, y sobre todo fertilizaciones, generalmente a dosis decrecientes, controlando la erosión hasta que la flora local consiga entrar y colonizar el espacio sembrado. Ello ocurre cuando éste ya ha incorporado un mínimo de materia orgánica que, mediante el incremento de la porosidad, de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), y de la mineralización de la materia orgánica, le confieren la fertilidad mínima necesaria para que progresivamente pueda evolucionar hacia la vegetación clímax.

Por todo ello, aunque la siembra sea con semilla local adaptada al biotopo, **es imprescindible realizar un seguimiento de la evolución florística con operaciones de mantenimiento, sobre todo a base de fertilización de soporte, resiembra en las zonas con calvas de vegetación, y el repaso de los elementos de control de la erosión.**

4. Diagnostico del entorno a restaurar

Para no limitar las posibilidades de éxito de la restauración de una zona degradada por catástrofe natural o antrópica, se debería conformar un equipo multidisciplinar que, en sentido amplio, según complejidad y disponibilidad de recursos, debería estar formado por especialistas en botánica/ecología, geología, y edafología, siendo dirigidos por un ingeniero agrónomo (el responsable de la redacción del proyecto de revegetación). Este equipo sería el encargado de realizar un diagnóstico del entorno a restaurar.

En primer lugar, según nuestra experiencia, es imprescindible visitar el terreno, pues los detalles observables *in situ* pueden resultar cruciales. Por extraño que parezca, **demasiados fracasos se acumulan en proyectos realizados exclusivamente desde la oficina técnica**, confiando solo en la información cartográfica disponible (ortofotos, topografía, y mapas temáticos de flora, geología, riesgos naturales, edafología, etc.) que, aunque suele ser de gran ayuda, generalmente la escala disponible es demasiado pequeña para el propósito de una restauración ambiental.

Cuando se pretende restaurar una zona afectada por una catástrofe natural, un **paso previo debe ser la evaluación de la estabilidad de taludes y laderas a los movimientos en masa. Si la zona no tiene un mínimo de garantías de estabilidad a los deslizamientos, o está sometida a fuertes procesos erosivos, no tiene interés intentar la revegetación de los mismos hasta que los terrenos no se hayan estabilizado, natural o artificialmente.**

Si bien el estudio de la vegetación de referencia de los alrededores resulta obvio, no sucede lo mismo en referencia al **análisis del pastoralismo existente**: tipos de ganado, rutinas pastorales, y sobre todo la relación de gestión entre el titular de los pastos, los ganaderos y los pastores. Si no se consigue un acuerdo de gestión con los ganaderos, resulta entonces que una exitosa revegetación inicial, por causa de su mayor palatabilidad y valor pastoral, atrae al ganado y la puede arruinar por pisoteo y arranque de plántulas, especialmente en condiciones de suelo húmedo. Como veremos más adelante, también se puede y debe establecer sinergias entre el ganado y el procedimiento de revegetación.

En la medida de lo posible, se recomienda la realización de **análisis de suelos** de la zona a sembrar y de las comunidades vegetales de los alrededores que tomamos como referencia. Los análisis de suelos son de gran ayuda para determinar con conocimiento de causa los fertilizantes y/o enmiendas que puedan resultar necesarios. Importante analizar la pedregosidad (partículas $\varnothing > 2$ mm), muy abundante en estos suelos, pues a efectos de fertilidad interesa solo la fracción fina del suelo hasta la profundidad explorada por las raíces.



5. Redacción del proyecto y dirección de obra

Una vez se dispone del diagnóstico del entorno a restaurar, la ingeniería seleccionada procederá a realizar el proyecto de medidas correctoras en base a la generación y selección de alternativas técnicas de tratamiento de las diferentes problemáticas que afecten a las vertientes y taludes a restaurar, buscando optimizar la inversión en base a los recursos económicos disponibles y según directrices de la propiedad, todo ello minimizando el impacto ambiental global (catástrofe-medidas correctoras).

La extensión del proyecto se adaptará a la envergadura de los trabajos que se deba acometer, y del tiempo disponible. Dado que generalmente se debe tomar medidas urgentes para reparar daños y limitar la ocurrencia de nuevos episodios, **suele ser de interés realizar un estudio preliminar de propuesta de medidas correctoras** para fijar estrategias y ordenes de magnitud de costes ($\pm 30\%$ de error admisible), para que se pueda anticipar la toma de decisiones por parte del promotor de la restauración. Por ello, la guía de actuación incorpora ordenes de magnitud de costes para las diferentes medidas correctoras propuestas en el documento.

Si bien cabe la posibilidad de que en proyectos de poca envergadura, estos puedan ser acometidos directamente por los trabajadores de la entidad pública responsable de la restauración, lo más habitual es que se proceda a su licitación para la ejecución de los trabajos por parte de empresas privadas de obra pública y restauración ambiental. Por ello, el **documento proyecto deberá de contener**: 1) Pliego de condiciones administrativas, 2) Pliego de condiciones técnicas, 3) Cuadro de precios unitarios, 4) Presupuesto, 5) Planos (ver figura 1 como ejemplo), 6) Memoria y anejos justificativos.

Para este tipo de proyectos es muy importante la planificación, como anejo a la Memoria, se debe preparar un cronograma para las diferentes actuaciones, especialmente si se pretende vegetalizar mediante semilla local, para que el productor se pueda organizar. **Para la ejecución de los trabajos se debe reservar un porcentaje importante de paros por mal tiempo**, especialmente cuando hay riesgo de tormentas con aparato eléctrico. Es pues importante tener actividades alternativas comodín.

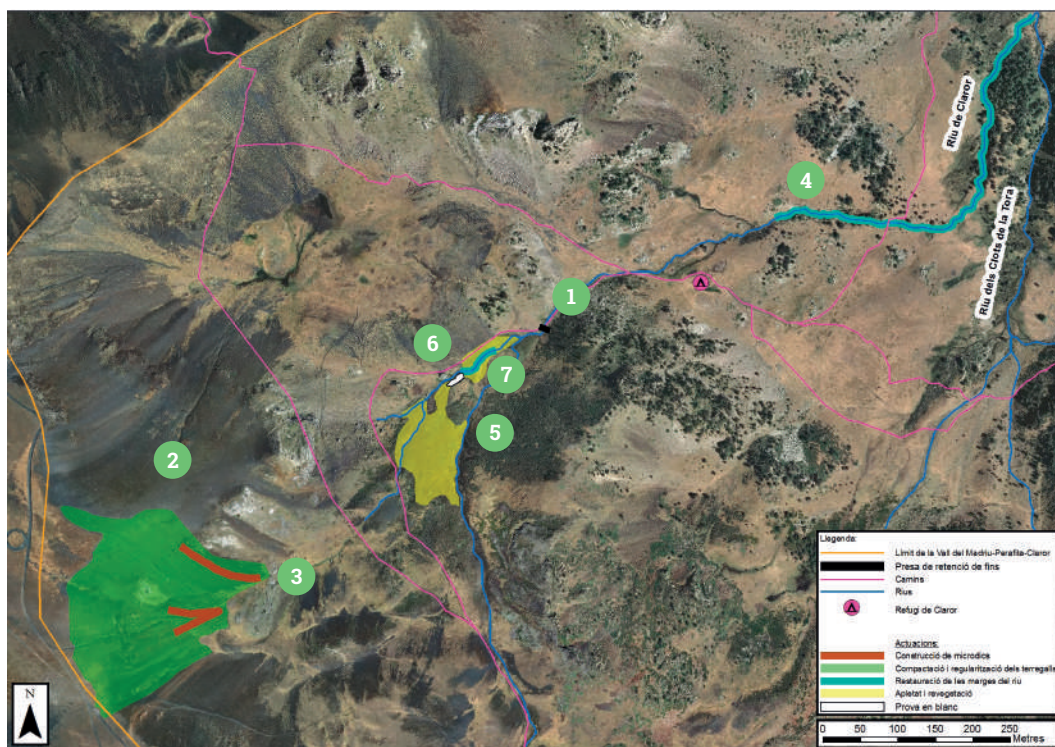


Figura 1: Planta general, biotecnias de restauración ambiental de la cuenca del torrente de Claror: (1) Presa de retención de finos, (2) Compactación y regularización de los terreros de cabecera de cuenca, (3) Microdiques de ramaje, (4) Restauración de márgenes del torrente de Claror, (5) Redileo mediante rebaño de ovejas, (6) Revegetación y (7) Prueba en blanco.

En relación a la evaluación económica y financiera, como salvedad para este tipo de proyectos, se debe poner de manifiesto para el conocimiento de la propiedad los beneficios indirectos no cuantificables económicamente como la preservación de la calidad del suelo, la reducción de riesgos y del aporte de sedimentos aguas abajo, así como el incremento de disponibilidad de agua por mayor infiltración. Aunque parezca obvio, para evitar sorpresas, también se debe hacer notar a la propiedad que en estas zonas de montaña, por causa de las dificultades de acceso, se incrementa sobremanera el coste de ejecución en tiempo y dinero, en comparación a los mismos trabajos realizados en zonas fácilmente accesibles.

La posibilidad de obtener financiación mediante venta de créditos de carbono por la fijación de CO₂ en el suelo, debe ser investigada.

La realización por parte de un gabinete de ingeniería especializada en restauración ambiental del estudio posterior a una catástrofe natural o antrópica, con diagnóstico inicial, propuesta y planificación de medidas correctoras, valoración económica y preparación de la documentación para licitar los trabajos, puede tener un **coste de proyecto comprendido entre 25.000 y 35.000 €**, o más, según extensión de la zona a restaurar y dificultad de los trabajos técnicos.



Para la **dirección de obra se debe contar con unos 15.000 €/año durante la ejecución de los trabajos, y unos 8.000 €/año para el seguimiento y pilotaje durante los 3 años post siembra, y unos 2.000 €/año hasta el fin del acompañamiento.**

Tipologías de gestión y prácticas de manejo más adecuadas para hacer frente al riesgo.

En referencia a las herramientas concretas del tipo NBS que se propone en esta guía, experimentadas dentro de la UE por primera vez en Andorra para el control de la erosión en altitud, cabe decir que, aunque los resultados conseguidos han sido muy satisfactorios en general, espectaculares en algunos casos, la replicación de estas prácticas se debe acometer con cautela por la falta de conocimiento científico en la materia. En 2022 hemos tenido un fracaso, que abre un cierto número de interrogantes, y que comentaremos más adelante.

Consideramos que hace falta continuar investigando y replicando estas experiencias piloto del tipo NBS en otras zonas para afianzar la estrategia.



6. Ovinorremediación

6.1 Definición, aplicación y posibilidades.

Definimos ovinorremediación como aquellas técnicas de restauración ambiental que se basan en el uso de rebaño de ovejas para tareas de mitigación de riesgos y de mejora ambiental.

En los trabajos de restauración de la zona de Claror hemos empleado la ovinorremediación en dos de sus acepciones:

1. **Para compactar el suelo, y suavizar la sección de los regueros y de las cárcavas mediante pisoteo de ovinos** (ver figura 2).
2. **Para fertilizar el suelo mediante redileo nocturno previamente a la siembra** (ver figura 4).

No obstante, como es sabido, la ovinorremediación se aplica **también para la prevención del riesgo de incendios (3)**, usando los animales como desbrozadores, tanto por el pasto que ingieren, como por el desbrozado de matorral y pastos bastos mediante pisoteo de las zonas de transición a los bosques, donde se acumula gran cantidad de biomasa combustible, limitando así la velocidad de avance del fuego y facilitando su extinción. Estos trabajos se pueden mejorar o completar incorporando un determinado porcentaje de cabras en el rebaño por su mayor capacidad de desbrozado de arbustos y árboles, especialmente en las zonas más inaccesibles.

Las ovejas, así como las cabras, también pueden ser utilizadas para trabajos de desbroce **para mejorar pastos abandonados (4)**, recuperando biodiversidad, productividad, y valor pastoral.

Mediante el pastoreo ovino moderado **en las zonas de salida de aludes de fondo, se reduce su frecuencia y severidad (5)**, porque el paso del ganado incrementa la rugosidad del terreno mediante el pronunciamiento de las terrazas de solifluxión en los pastos de *Festuca eskia* por los caminitos que se forman mediante pisoteo. También al comer las hojas de la planta, se limita el abatimiento (mediante la reptación de la nieve durante la fusión) del pasto agostado, el cual favorece que las hojas de la planta queden extendidas vertiente abajo, recubriendo la tierra y las piedras, generando así un plano de lubricación en la interfase nieve-terreno, que interesa

evitar. Si las macollas de *festuca* están pastadas en la zona de salida de aludes, estas permanecen erectas con mayor facilidad y actúan como una armadura a tracción que amarra el manto nival al terreno.

También se puede utilizar el rebaño de ovejas **para ayudar a pilotar el incremento de biodiversidad en diversas zonas en que los pastos se hayan degradado por infrapastoreo (6).**

Entendemos que sería de interés difundir el concepto de ovinorremediación, para así sensibilizar más fácilmente a la sociedad civil de la necesidad de conceder ayudas públicas al ganado ovino, y por extensión a la ganadería de montaña, por el retorno indirecto que el pastoreo dirigido puede procurar a la sociedad en forma de bienes y servicios ecosistémicos.

Por analogía también se puede definir la caprinorremediación, aunque no la hemos utilizado en este proyecto.

6.2 Regularización de regueros y cárcavas mediante pisoteo ovino.

A la vista de cómo quedó de maltrecha la zona superior de la cuenca hidrológica (entre los 2.400 y 2.600 m s.n.m.), llena de regueros y cárcavas (ver la fotografía de la portada), superando en algunos lugares los 3 metros de profundidad, llegamos a la conclusión de que la vertiente no se podría estabilizar mediante siembra, por el derrumbe constante de las paredes casi verticales que quedan al paso de las lavas torrenciales (ver figuras 2, 5 y 6). **Resulta necesario que se haya regularizado la superficie de la vertiente para poder sembrar y tener un mínimo de garantías de éxito en estas condiciones de fuerte pendiente.** Desde el punto de vista geomorfológico de los factores formadores, difícilmente la superficie se habría alisado suficientemente a escala temporal humana, más bien lo contrario, pues alguna de las cárcavas podía acabar evolucionando en barranco.

La gran superficie afectada, y la elevada inclinación de la vertiente (25° en la parte inferior y alrededor de 35° en la parte más escarpada), hacían imposible plantearse la realización de trabajos de regularización manual o mecánica (retroexcavadora de tipo araña). No era factible abordar estos trabajos, por imposibilidad física, pero sobre todo por causa del elevado riesgo que supone transitar por la parte superior de estas vertientes, ya que, en caso de caída del personal o la máquina, el resultado puede ser fatídico. Por lo que, desde nuestra experiencia en pastoreo de ganado por el Pirineo andorrano, se nos ocurrió improvisar mediante la realización de pasadas en sentido descendente del rebaño de ovejas que había en las cercanías.

Se llevó a cabo un primer ensayo experimental entre los meses de agosto y octubre de 2015 (ver figura 2), con resultados muy satisfactorios, por lo que se decidió repetir la acción en 2016, pero en este segundo caso contratando los servicios al pastor, puesto que se debe compensar la tarea de llevar el rebaño a la fuerza, a lugares donde las ovejas normalmente no quieren acceder,

también por la pérdida de peso del ganado, y especialmente porqué corren riesgos de despeñarse y herirse, o incluso perder algunos efectivos, especialmente por las piedras que desprenden durante el tránsito y que a veces impactan en las ovejas situadas en la parte inferior.



Figura 2: Compactación y regularización de terrero erosionado mediante pisoteo con ovejas.

Con el paso del rebaño, se aceleró el proceso de consolidación natural dejando las cárcavas más cóncavas (ver figura 6), en vez de “rectangulares” con paredes verticales (la morfología que queda después del paso de las lavas torrenciales). Mediante pisoteo, además se compacta las tierras superficiales haciéndolas menos sensibles a la erosión. Todo ello hizo los terreros más estables y limitó que haya material fino fácilmente a disposición dentro de la vaguada de las cárcavas, ya que, por la elevada proporción de material arcilloso, éste es el máximo responsable del incremento de la turbidez en el torrente. Efectivamente, una vez que los limos, y sobre todo las arcillas, son incorporados al curso permanente de agua superficial, se mantienen en suspensión coloidal a lo largo de todo el recorrido.

Los trabajos de regularización de terreros se deben aplicar por lo menos durante 2 o 3 años consecutivos, dando entre 15 y 25 pasajes por temporada, ya que, una vez fragilizado el suelo, las heridas continúan progresando, incluso con pequeñas tormentas, y después de la fusión de la nieve, especialmente si le acompaña lluvia.

En referencia a los **costes de la regularización de regueros y cárcavas mediante ovinorremediación por pisoteo**, siempre considerando que por lo general se ejecutará a gran altitud y en zona de difícil acceso, para tener un primer orden de magnitud a la hora de contemplar esta posibilidad, se debe contar con un coste aproximado de unos **250 €/día regularización cárcavas/1.000 ovejas** (año 2016, Andorra).

Si se ejecuta estos trabajos conjuntamente con los de redileo, que comentamos a continuación, se optimiza el coste, puesto que el pastor mira de ajustar las rutinas de pastoreo alrededor de la zona a restaurar para poder hacer las dos actividades simultáneamente. Estos costes son

en la hipótesis favorable de que en la zona hay un rebaño autóctono en trashumancia que tiene contratados pastos en las cercanías año tras año.

Para tener una noción simplificada, a nivel de anteproyecto, el coste de este servicio por la superficie desnuda tratada, tanto si es de erosión como si es de acumulación de sedimento, se debe contar con un mínimo de **5.000 €/ha/año regularización cárcavas** (rebaño de ~ 1.000 ovejas, año 2016, Andorra). En Claror 2 años fueron suficientes.

6.3 Fertilización de la zona a sembrar mediante redileo nocturno.

Como introducción, comentar que partíamos de experiencias previas exitosas de revegetación en taludes de carretera en altitud, para los que no se disponía de tierra vegetal y se generó "tierra vegetal artificial" a partir de suelo estéril procedente del movimiento de tierras, que se fertilizaba en un espesor de 15 cm mediante excavación, tamizado a 30 mm, y mezcla con estiércol fermentado en cantidades suficientes para aportar los elementos nutritivos N-P-K necesarios para que al tercer ciclo vegetativo, hubiese mineralización suficiente como para satisfacer las necesidades nutritivas de la vegetación sembrada. Conviene hacer notar que el estiércol fermentado es de liberación lenta, puesto que la duración máxima del aporte fertilizante por mineralización de este tipo de enmienda orgánica es de alrededor 3 años, y que la aportación de minerales se realiza en dosis decrecientes a la mitad del año anterior, año tras año, lo que favorece la transición hacia la flora autóctona menos dependiente del fertilizante, una vez que se ha establecido el recubrimiento vegetal protector de la erosión.

No menos importantes fueron las experiencias infantiles con el abuelo cambiando los rediles de madera, formados por "andàs" a base de 3 bigas de pino de unos 3,5 m, atravesadas por palos verticales de avellano, que se disponían formando un encierro rectangular dentro de los prados de siega del pie de valle en Arans (Andorra) donde durante el verano, el rebaño se bajaba a pasar la noche en el redil desde los pastos forestales y supraforestales realizando un transporte vertical de nutrientes hacia los prados de siega. La rotación del redileo en los prados era de 3 años, coincidente con lo indicado en la bibliografía especializada para la mineralización del estiércol.

De la amalgama de las dos experiencias anteriores surgió la idea de recuperar la aplicación de la ancestral técnica del redileo en los suelos estériles neoformados después de la catástrofe, ya sea por erosión o por deposición de los sedimentos arrastrados por las lavas torrenciales. Las cagarrutas y la orina de las ovejas aportan nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes de liberación lenta, que facilitan el establecimiento y el desarrollo de la vegetación.

Antes de la siembra a gran escala se hizo un ensayo piloto en 2015, mediante dos parcelas experimentales en las que se sembró *Festuca eskia*, en la una directamente sobre terreno sin fertilizar y en la otra aplicando la técnica del redileo por unos días. **La diferencia de biomasa**

producida al finalizar el primer ciclo vegetativo fue 8 veces superior en la parcela fertilizada mediante redileo (ver figura 3), con lo que la decisión de la estrategia a usar fue fácil de tomar. Además, el rebaño ayuda a compactar y estabilizar el suelo (ver figura 4).

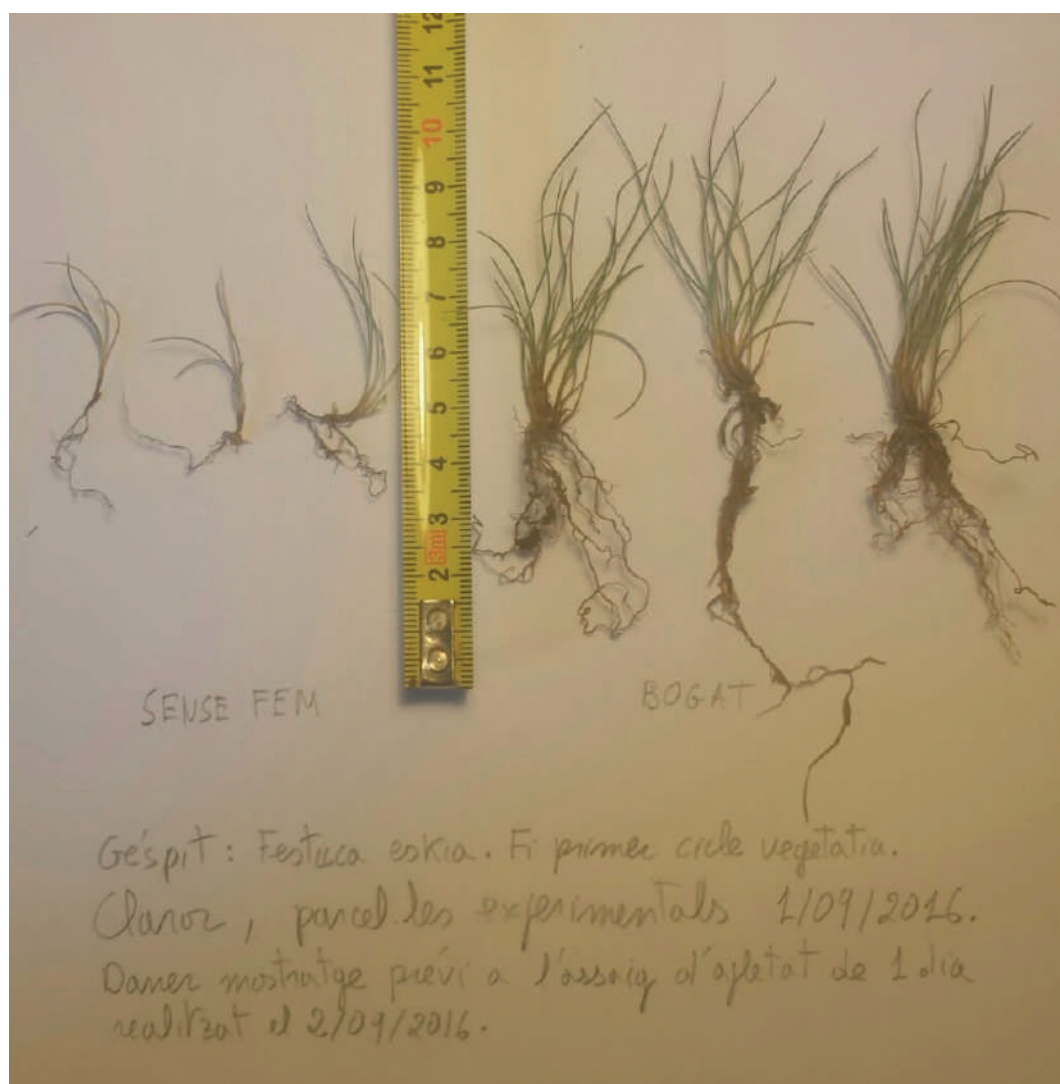


Figura 3: Comparativa del crecimiento de *Festuca eskia* a fin del primer ciclo vegetativo, según si la parcela fue o no fertilizada mediante redileo con rebaño de ovino.

De día, el rebaño pasta en las cercanías, y a finales de la tarde, justo antes del anochecer se lleva las ovejas al redil, que se coloca en suelo desnudo, donde pasa entre 10 y 12 horas. A criterio del pastor, según disponibilidad de pasto y previsión meteorológica, por la mañana el rebaño se conduce hacia la parte alta de la montaña, y mediante la ayuda de los perros se hace bajar a las ovejas por los terreros erosionados para que por pisoteo vayan regularizando los regueros y las cárcavas, repitiendo el ciclo día tras día en la medida que lo permiten las disponibilidades de pasto y la meteorología.

Para la siembra a gran escala de 2016, se trataba de enriquecer unos suelos huérfanos de materia orgánica y fertilidad mineral antes de la siembra. Se aplicó el redileo desde finales de agosto hasta principios de octubre de 2016, utilizando un redil propio para ovejas, energizado mediante electrificador solar. El rebaño, durante el período de redileo, tenía entre 1.300 y 1.450 ovejas.



Figura 4: Redil de entre 4 y 6 noches por parcela para compactar por pisoteo y fertilizar el suelo estéril antes de la siembra. Nótese la regularización de la superficie y la densidad de cagarrutas.

A intervalos de entre cuatro a seis días, se fue cambiando el redil de lugar. El tiempo de estada en redil se ajusta en función de la carga de redileo (ovinos/m²) para mantener una dosis de fertilizante aproximadamente constante, vigilando que por una parte no haya errores de gestión para que la mineralización del primer año no supere la dosis media máxima admisible en parcela, en referencia a la admisible en cultivo ecológico (170 UN/ha); y por otra parte, que no supere en determinadas zonas donde la acumulación de las ovejas se vea favorecida, el umbral de riesgo de quemado por salinidad (sequia por exceso de presión osmótica en la solución del suelo), que empíricamente según pastores locales, se produciría para una carga de redileo acumulado superior a 7 ovinos x día/m².

Con el objetivo de homogeneizar mejor el reparto de la fertilidad y reducir costes alargando los días de estada en cada redil, la densidad de redileo empleada fue de media a baja (entre 0,85 y 0,35 ovinos/m²). Esta variabilidad fue generada a propósito, con carácter experimental (puesto que no fuimos capaces de encontrar experiencias asimilables en la bibliografía), para poder detectar qué densidades pueden ser más eficientes en la restauración ambiental de los diferentes sectores aún pendientes de tratamiento. No pudimos extraer conclusiones a causa de una lluvia de 100 mm de finales de otoño, que se llevó parte de las cagarrutas. Aun así, el aporte

fertilizante fue suficiente, pues no se detectaron deficiencias en el crecimiento vegetativo hasta llegado el cuarto año post siembra, en que faltó nitrógeno y las plantas amarillaron en comparación con las existentes en la zona, coincidiendo pues con la literatura en el sentido de que las enmiendas orgánicas van liberando por mineralización el N hasta el 3^{er} año aproximadamente.

La superficie de los rediles para este tamaño de rebaño, oscilaba entre 1.700 y 4.000 m². Para el cambio de redil, en promedio se debe contar con 3-5 operarios entre 3 y 5 horas cada 5 días, ello sin contar el desplazamiento. En nuestro caso, unas 5,5 horas (subida y bajada) en total destinadas a desplazamiento, de una jornada de 8 a 10 horas.

En referencia a los costes de realización de esta operación, siempre considerando que por lo general se ejecutará a gran altitud en zona de difícil acceso, se debe contar a nivel de estudio preliminar o anteproyecto con unos **500 €/día redileo/1.000 ovejas** (Andorra, año 2016). Para el cambio de redil se cuenta con un desplazamiento promedio de 4 horas en vehículo todo terreno más 1,5 h a pie (ida y vuelta), y la compra del redil electrificado con piquetes de fibra, pastor eléctrico con placa solar, piquetes extra para cambios de dirección, piquetas de anclaje, martillos, etc. También incluye unos 200 €/día de contratación de los servicios de ovinorremediación al pastor por prestar el rebaño para el redileo más su trabajo para encerrar y liberar el ganado a diario, coste que se podría descontar si se simultanea el redileo con la regularización de los terreros erosionados, según descrito al apartado 5.2.

Para tener una noción simplificada, a nivel de estudio preliminar o anteproyecto del coste de este servicio, calculado por la superficie desnuda tratada, tanto si es de erosión como de acumulación de sedimento, se debe contar con un mínimo de **9.000 €/ha fertilizada a 3 años mediante redileo** (Andorra, año 2016).

6.4 Posibles problemas y eventuales soluciones.

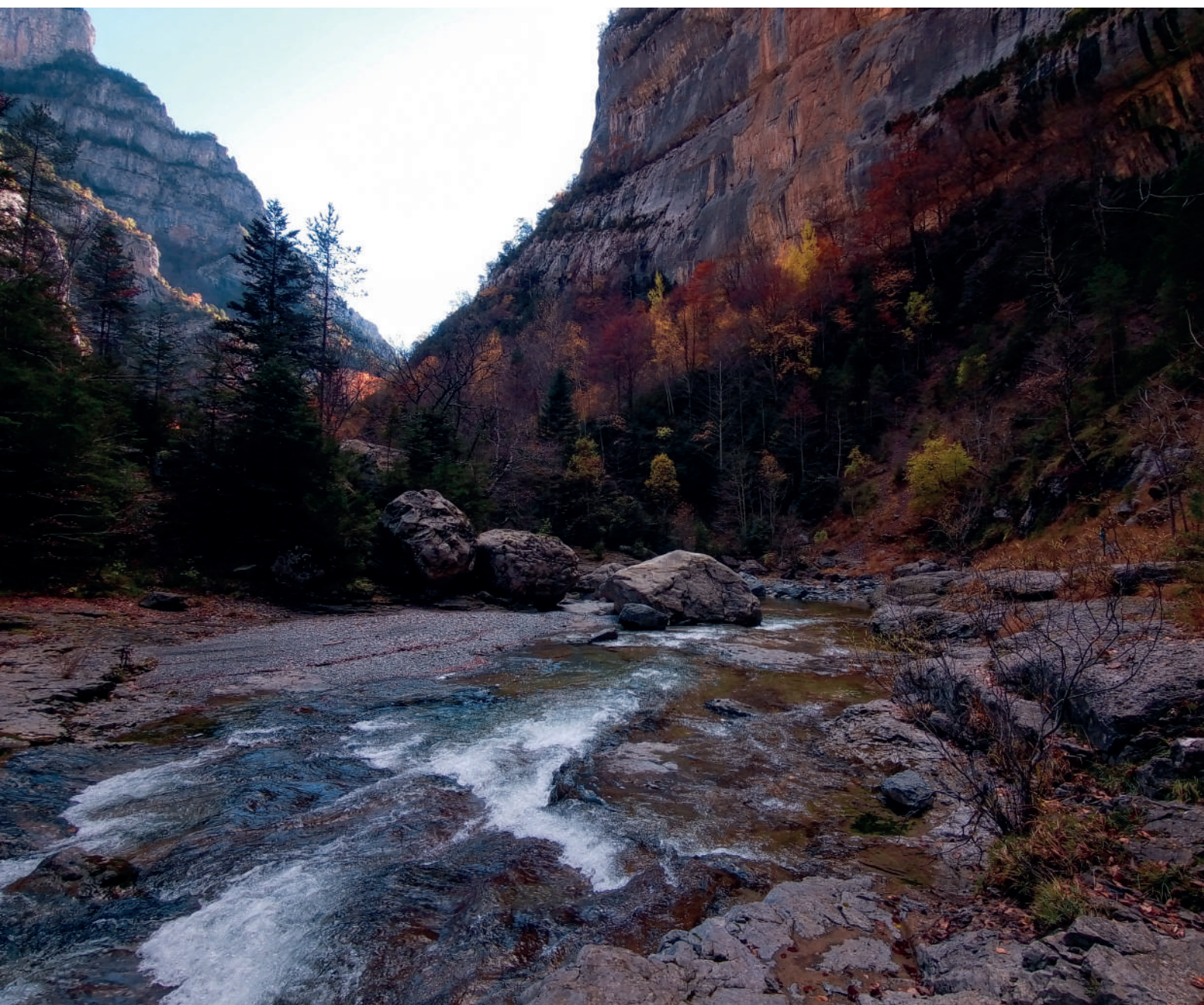
- A. En el Pirineo, especialmente en la alta montaña, no es fácil encontrar pastores en las cercanías de la zona de interés, y aún menos que estén dispuestos a hacer estos trabajos, aunque sean remunerados, con lo que es muy importante ofrecer ayudas de todo tipo al ganadero y al pastor para que se sientan implicados en la restauración ambiental. Generalmente las estivas están contratadas de un año para otro, y para cambiar de zona es necesario romper una gran inercia al cambio y, sobre todo, comprender que el pastor debe poder compatibilizar sus rutinas pastorales en otras zonas para el mejor engorde del ganado, pues no puede por lo general dedicar el rebaño en exclusiva a los trabajos de ovinorremediación. **Pensar que solamente con el incentivo económico podemos conseguir que el pastor cambie de estiva, sería un gran error.** La empatía y proximidad para negociar con ellos es fundamental. Por ejemplo, un acercamiento al pastor vía un familiar o un conocido, puede mejorar los resultados. A parte de la

compensación económica, se debe ofrecer ayuda en forma de mano de obra, por ejemplo, para el cambio de montaña, para cambiar el redil, subir comida y sal al refugio, etc. En caso de que se deba importar el rebaño, suponiendo que se encuentra uno disponible, entonces los costes se disparan sobremanera. Es de interés comentar que en Andorra ya empieza a haber competencia entre municipios (parroquias) para contratar rebaños para la realización de trabajos de ovinorremediación.

- B. Es importante que los trabajos de ovinorremediación, especialmente si se monetizan, sean supervisados por un responsable técnico,** puesto que en caso de sobrepastoreo podrían acabar ocasionando el efecto contrario al deseado, pérdida de biodiversidad e incremento de la erosionabilidad. También para asegurar resultados, puesto que los pastores, por lo general, tienden a evitar la entrada del ganado en estas zonas con pastos de pobre o nulo valor pastoral, que además son peligrosas tanto para el pastor como para el ganado.
- C. Para la realización de los trabajos de regularización y compactación de regueros y cárcavas, se debe garantizar al ganadero que las eventuales pérdidas de ganado por despeñamiento o caída de piedras, entre otros posibles daños, serán asumidos y compensados por la parte contratante.**
- D. Al no haber pasto disponible en la zona del redil, las ovejas prefieren estar en las zonas más planas, de manera que las zonas más inclinadas, reciben poca fertilización.** En algunos de estos lugares, a posteriori se debe proceder a **realizar fertilizaciones manuales para salvar el desarrollo de las plántulas.** Dado que se observa acumulación de estiércol en ciertas zonas preferidas para el descanso de las ovejas, se puede recoger parte de estos excedentes mediante paleta y capazo, para esparcirlo en las zonas con pocas cagarrutas para generar una mejor homogeneidad de conjunto. Se debe estar pendiente de las posibles tormentas de otoño en las zonas ya fertilizadas mediante redileo puesto que las cagarrutas, en zonas de pendiente pronunciada, hasta que no se recubren con el mulch de paja (protección de la siembra para retener humedad, estabilizar temperatura, y controlar la erosión) se arrastran fácilmente mediante el agua de escorrentía. Después de la fusión de la nieve, también se debe verificar si ha habido pérdida del fertilizante, para compensar durante el ahijado de las gramíneas, si necesario.
- E. En zonas muy inclinadas, por encima de los 20 a 25°, el redileo presentará grandes dificultades** para el adecuado descanso de las ovejas, y de heterogeneidad en la distribución de las cagarrutas, además de una mayor susceptibilidad al arrastre por las lluvias o fusión de la nieve. **En este caso, si la siembra está prevista a bandas y con mulch de protección, se podría preparar un redil de recolección en una zona llana y de superficie lisa cercana, y transportar el estiércol hasta las bandas que se van a sembrar, acto seguido realizar la siembra y aplicar el mulch protector.** Las bandas no sembradas, que se destinan a resiembra natural, se deberían fertilizar con la misma técnica a partir del segundo ciclo vegetativo de la *Festuca eskia*, una vez verificada la

producción de semilla suficiente. En este segundo caso, no es necesario aplicar mulch protector puesto que el espacio entre bandas ya estará protegido por la vegetación de las bandas superiores, no habrá prácticamente erosión laminar, solo por salpicadura, no siendo ésta preocupante de cara a la fertilización.

- F. Se debe **evitar los días de lluvia** en que el suelo esté saturado, no se debe cerrar el rebaño dentro del redil por el barro que se forma, que a posteriori provocaría compactación superficial por ascenso de limos y arcillas a causa del pisoteo, además de las irregularidades superficiales al secarse el barro que perjudicarían la siembra.





7. Microdiques de ramaje para el control de lavas torrenciales

7.1 Objetivo.

Ante la evidencia de que no era factible la realización de siembras en la vertiente fuertemente erosionada por regueros y cárcavas (ver fotografía de portada), hasta que la superficie no se hubiese regularizado y consolidado, y también era necesario que se hubiese estabilizado la circulación de lavas torrenciales. Para acelerar el proceso, se decidió aplicar dos soluciones complementarias basadas en la naturaleza (NBS):

1. Para la regularización del terrero en sentido de las curvas de nivel y la consolidación de los materiales sueltos, usamos la técnica de ovinoremediación por pisoteo de ovejas (ver apartado 5.2).
2. Para la estabilización de las lavas torrenciales, ensayamos por primera vez la construcción de microdiques de ramaje para la contención de las lavas dentro de los canales de paso de las mismas (cárcavas).

Mediante los microdiques se pretende contener el transporte masivo de los sedimentos que se vehiculan por la cárcava, principalmente en forma de lava torrencial con matriz de limos y arcillas, o en forma de flujo hiperconcentrado, controlando así su erosión. Una vez el terreno fragilizado, se observó formación de lavas torrenciales a partir de precipitaciones de tan solo 15 mm, si estas caen en forma de tormenta intensa.

Dado que el evento meteorológico de lluvia extrema que ha provocado esta catástrofe natural tiene un período de retorno estimado de 100 años aproximadamente, los microdiques se ejecutan con la finalidad de contener lavas torrenciales de menor caudal y volumen, a manera que éstas puedan ser contenidas progresivamente por los microdiques desde aguas arriba hacia aguas abajo. Mientras estos no se rellenan, no hay aportación de sedimento arcillo-limoso al curso de agua principal, y por tanto la turbidez en las aguas superficiales queda controlada y no genera entonces los problemas de potabilidad que se pretende subsanar.



Figura 5: A izquierda cárcava con microdiques recién contruidos, obsérvese el suavizado cóncavo de la cárcava por pisoteo del ganado. A derecha retención de las primeras lavas torrenciales, obsérvese las paredes verticales y el cordón de desbordamiento que se forman al paso de las lavas.

7.2 Procedimiento.

Los microdiques de ramaje se realizaron con ramas de avellanos procedentes del desbrozado de los márgenes del camino pedestre de acceso al valle del Madriu-Perafita-Claror, que el ayuntamiento desbroza bianualmente puesto que es muy transitado por excursionistas. Las ramas, una vez secas, se transportaron mediante helicóptero unos 1.000 m de desnivel.

Los microdiques se construyen perpendicularmente al eje de la cárcava y a equidistancias en relación inversa a la pendiente de la vertiente. Si bien es factible realizar cálculos teóricos aproximados para evaluar la equidistancia entre microdiques, recomendamos verificar in situ la pendiente de estabilización promedio de las lavas cuando estas se detienen (variable según porcentaje de arcilla y de agua de la matriz). Entonces se trata de ajustar ésta pendiente entre la coronación del microdique de aguas abajo y el pie del de aguas arriba, dejando un resguardo no inferior a los 10 cm, para que no quede al descubierto el pie si la equidistancia fuere demasiado grande, o en caso contrario quede parcialmente aterrado. Se trata entonces de hacer el ejercicio geométrico en función de la pendiente promedio de la vertiente a estabilizar para obtener

así la equidistancia de ejecución sobre el terreno. Es suficiente resolver esta geometría de 5 en 5°, hasta como máximo los 30 – 35° a partir de donde ya se debe abandonar la instalación de microdiques. En nuestro caso los microdiques se construyeron a equidistancias comprendidas entre 5 y 8 m por lo general, aunque en algún caso se llegó a los 10 m.

En cuanto a la altura, **el microdique se debe dejar unos 30 cm por debajo de la rasante del terreno circundante, quedando como resguardo de seguridad suplementario la coronación del cordón lateral de desbordamiento que se forma con la circulación del frente de lava a ambos lados del trayecto.** Ello con el objeto de fijar un camino preferente para que cuando circulen nuevas lavas, éstas no desborden e invadan otras zonas no erosionadas. En la coronación se pone una barra lo más resistente posible de entre las disponibles, que irá de banda a banda, clavada en los laterales unos 50 cm.

El microdique se dispone inclinado a 45° aproximadamente (ver figura 5), con el objeto de que en el momento en que las lavas o el carreteo de materiales erosionados lo corone, el material no caiga verticalmente y erosione el pie de la estructura, de esta manera el microdique hace un acompañamiento a la lava en el vertido, que por fricción provoca pérdida de energía al flujo, limitando su poder erosivo al llegar al pie.

Las ramas pequeñas se disponen en forma de filtro vegetal, y los troncos de los avellanos se aprovechan para realizar los postes de sujeción, colocados en forma de V y también verticalmente, clavados hasta una profundidad de aproximadamente 1 metro (ver figura 5). Las ramas y los troncos se atan mediante cuerda vegetal, de modo que **los microdiques de ramaje son totalmente biodegradables** y, al final de su vida útil (6 a 8 años), se empiezan a descomponer. Momento en el que o bien la vertiente ha empezado a estabilizarse, o bien se deben reconstruir los microdiques, según necesidades.

7.3 Resultados.

Los microdiques por **efecto barrera**, han retenido las lavas torrenciales que circulan durante las tormentas estivales y durante la fusión de la nieve, y por **efecto filtro**, también han retenido los arrastres menores del tipo flujo hiperconcentrado (fluido no newtoniano) y avenida de agua (fluido newtoniano). Al maximizar la pérdida de energía por fricción del fluido, se evita que las cárcavas se hagan todavía más profundas. Tampoco se ha constatado interferencias entre estas estructuras y el rebaño mientras se llevaban a cabo las labores de ovinoremediación (ver figuras 5 y 6).

En referencia al **coste económico por unidad de microdique de ramaje** que cubre una longitud de entre 5 a 8 metros en planta, para cárcavas de entre 1,5 a 3 m de profundidad, cabe decir que puede ser muy variable en función de la geometría de la zona a represar y de la dificultad del desplazamiento de los operarios. En este caso particular, mediante heliportaje de los avellanos, herramientas, y trabajadores para una jornada de 10h, obtenemos un coste de **800 €/microdique, valor válido solo a nivel de estudio preliminar** (Andorra, año 2016).



Figura 6: A izquierda cárcava con microdiques recién construidos, obsérvese el suavizado cóncavo de la cárcava por pisoteo del ganado. A derecha retención de las primeras lavas torrenciales, obsérvese las paredes verticales y el cordón de desbordamiento que se forman al paso de las lavas.

7.4 Posibles problemas y eventuales soluciones.

- A. La realización de este tipo de microdiques ha sido experimental, ya que no se encontró bibliografía alguna relativa a esta técnica concreta de restauración ambiental basada en la naturaleza, y si bien en nuestro caso no falló ninguno de los 25 microdiques ejecutados (dos de ellos de piedras), se debe contemplar la posibilidad de fallo. Por lo que **se debería prever la realización de un seguimiento y un mantenimiento**, ya que la rotura o fallo de algunos de ellos, quizás podría acabar teniendo un efecto dominó afectando a todos los de aguas abajo.
- B. Por ello, es importante que, aunque su implantación sea urgente, **no se improvise su ejecución a causa de su aparente simplicidad, dejando el diseño y la dirección de los trabajos en manos de un ingeniero conocedor de estos fenómenos torrenciales.**
- C. **No se detectaron problemas de interacción con el manto nival.** Temíamos que quizás podría haber problemas de hundimiento con el peso de la nieve puesto que si las primeras nevadas vienen sin viento queda la cavidad interior del microdique hasta el terreno natural sin nieve, por lo que la parte superior tiene que soportar hasta la primavera todo el peso del manto nival. Generalmente a esta altitud y en la zona con cárcavas, los aludes de fondo son probables, y podrían arrastrar las estructuras. Incluso la propia reptación de la nieve en primavera podría arrancar los elementos. Aunque en la experiencia de Claror no tuvimos ningún problema en este sentido a pesar de que alguno de los inviernos hubo más de 2 metros de nieve a final de temporada. No obstante, es evidente que podría haberlos, especialmente en caso de alud, por lo que el seguimiento y mantenimiento no se deben olvidar en estos casos.

- D. **En algunos casos, la falta de ramaje se puede sustituir por microdiques de piedra seca, pero son más costosos de construir, y paradójicamente menos estables**, puesto que la densidad de las lavas torrenciales es muy próxima a la de la piedra ($2,6 \text{ t/m}^3$) y desplaza los bloques de piedra por simple flotación. Por el contrario, el microdique de madera se ancla en el terreno mediante los postes verticales y transversales de fijación, lo que les confiere mayor resistencia al arrastre.
- E. **En el supuesto de que no sea posible realizar la corrección de una cárcava entera, es preferible empezar por la parte alta**, de esta manera se limita el crecimiento de las lavas torrenciales que tendría lugar al seguir avanzando la lava aguas abajo por la zona de erosión, a la vez que se protege de la erosión las paredes laterales de la cárcava en la zona de inicio, limitando así la erosión regresiva o remontante, que en caso de conseguirse se paralizaría la evolución de la cárcava.

No obstante, lo anterior, **si la cárcava o incluso el barranco tienen dimensiones considerables y se quiere intentar la restauración global a largo plazo, se debe entonces prever que la erosión remontante pueda proseguir, para que, de forma controlada, se vaya rellenando por etapas el barranco con ese material, haciendo crecer los microdiques, una vez los del estrato inferior estén llenos de sedimento**. Con este nuevo material procedente de la parte alta, se estabiliza los laterales del barranco y se controla su erosión. Todo ello requiere un detallado estudio topográfico con el correspondiente balance de volumetrías, haciéndolo compatible con los modelos de erosión de la vertiente.





MONBARRUEGO
2845 m.

8. Revegetación

8.1 Introducción.

Por motivos ambientales, interesa recuperar la vegetación autóctona preexistente, y con ella los hábitats (ver apartado 2.2). Si además la siembra se realiza mediante semilla local, recolectada en las cercanías, los riesgos de deriva genética en la comunidad de destino se minimizan, conservando de esta manera los ecotipos locales, sin hibridaciones con material genético de la misma especie evolucionado en otros ambientes.

Por motivos antrópicos, interesa controlar la producción y arrastre de sedimentos desde cabecera de cuenca (ver apartado 2.1). La espectacularidad en la reducción del factor “cubierta vegetal” en la ecuación universal de pérdidas de suelo, hace que conseguir una rápida revegetación de las zonas yermas, sea vital para poder controlar la erosión del suelo.

8.2 Selección de especies. Dosis de siembra.

A partir de la cartografía de flora, completada mediante inventarios florísticos y fitosociológicos, de los requerimientos pastorales, y de las necesidades de control de la erosión, se procederá a la selección de las especies a emplear y su procedencia.

No existe, a nuestro conocimiento, una metodología específica o protocolizada para la selección de las especies y su porcentaje de participación en la mezcla de siembra, se elige a criterio de experto en base intuitiva ponderando los factores anteriormente citados, donde la experiencia en revegetaciones anteriores asimilables es fundamental.

En cuanto a la dosis de siembra, por lo general esta se establece entre 200 y 300 kg de semilla/ha, independientemente de los porcentajes relativos de las especies empleadas en las diferentes fórmulas comerciales para hidrosiembra. **A nuestro entender, esta dosis es excesiva cuando las condiciones de germinación se prevean favorables, pues la densidad de plántulas resulta excesiva, produciéndose competencia, con reducción del crecimiento y mortalidad en**

edades tempranas. Los subministradores de semilla, por lo general indican el porcentaje de germinación mínimo de las especies, su pureza mínima y la composición de la mezcla en % en peso para cada especie. Este proceder, nos parece admisible para cuando se usa semilla comercial de especies domesticadas y por tanto de bajo coste, siempre y cuando se pueda controlar el abono de la certificación correspondiente por medio de la dirección de obra en base a resultados establecidos en el pliego de condiciones técnicas a corto y medio plazo.

Para trabajos de revegetación de calidad ambiental, mediante semilla local, consideramos el procedimiento anterior técnicamente deficiente, especialmente cuando el coste de obtención de la semilla o su disponibilidad sean los factores limitantes del proyecto. Efectivamente, cuando se usa en la mezcla de siembra semillas de peso unitario muy diferente, entonces con la misma dosis de siembra (kg/ha) se puede obtener densidades de las diferentes plántulas/m² que nada tienen a ver con la vegetación objetivo de referencia a conseguir. A título de ejemplo, para significar lo aberrante que puede resultar sembrar en base a kg/ha, para *Festuca eskia* hemos detectado diferencias entre zonas de recolección de semilla para un mismo año de más del doble del peso para 1000 semillas. En mezclas de semillas de especies varias, ya de por sí de tamaños y pesos muy diferentes, esta casuística se multiplica, de manera que este proceder, a medida que se profesionalice el sector, y se encarezca el coste de los combustibles fósiles, creemos que tenderá a desaparecer.

8.3 Diseño de la revegetación razonando en base a plantas/m². Método Claror.

En este supuesto, a criterio del técnico responsable de la siembra, **se fija de antemano la densidad de plantas deseada a fin del primer ciclo vegetativo**, momento en que se efectuará el control de la siembra. Si posible, una vez finalizada la germinación, al inicio del ahijado en los cereales, es de interés realizar un conteo de plántulas/m², para verificar la supervivencia posterior de cada especie. Mejorando así el conocimiento para su posterior pilotaje y aprendizaje.

Una vez fijado el número de plantas/m² objetivo, el cálculo de la dosis de siembra vendrá dado por el sumatorio de la dosis para cada semilla (i) de la mezcla, según la siguiente expresión:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{N_i \times P_{1000\ i}}{G_i \times 1000 \times p_i}$$

Donde:

D = Dosis de siembra en g/m² de las n especies que conforman la mezcla de siembra.

N_i = Número de plantas/m² de la especie i. Se corresponde con la densidad objetivo a fin del primer ciclo vegetativo para la especie i.

P_{1000 i} = Peso en gramos de 1000 semillas puras de la especie i.

p_i = Pureza de la semilla de la especie i , en tanto por uno.

G_i = Potencia germinativa en condiciones reales de campo de la especie i , en tanto por uno.

$G_i = g_i \times K_i$

g_i = Potencia germinativa en condiciones de laboratorio (ensayo de germinación), en tanto por uno.

K_i = Coeficiente de cultivo para la especie i , en tanto por uno. Expresa la reducción de la potencia germinativa que tiene lugar al pasar del ensayo de germinación en laboratorio, a condiciones reales de campo.

La potencia germinativa en condiciones reales de campo G_i requiere del preceptivo ensayo previo sobre el terreno. No obstante, se propone el **método “Claror”** con la intención de que, si es aceptado por la comunidad científica, durante los próximos años se vaya:

1. Recopilando datos de potencia germinativa real G_i de las diferentes especies de interés para revegetación en altitud, para diferentes condiciones tipo de “cultivo”: suelo, altitud, orientación y pendiente, entre otras que puedan resultar de interés.
2. Realizando ensayos de germinación en laboratorio para esas mismas especies, determinando g_i .
3. Obteniendo mediante cálculo los valores esperables para el coeficiente de cultivo K_i para esas diferentes condiciones de cultivo tipo, generando las correspondientes tablas de selección.

Una vez la comunidad científica hubiere puesto a disposición de los técnicos de terreno esos datos, ya dejaría de ser necesaria la realización del ensayo previo para conocer G_i , y el técnico responsable de la siembra podría calcular fácilmente y con una precisión aceptable las necesidades de semilla a recolectar para cada restauración que deba acometer, sin perder tiempo. En caso de que la siembra sea de una superficie importante, si se juzga oportuno, una vez recolectada la semilla se podrá verificar en laboratorio el valor real de g_i para la partida de semilla disponible, y así afinar la dosis real de siembra, optimizando costes de recolección y resultados de vegetalización.

8.4. Propuesta-ejemplo de revegetación específica para control de la erosión en altitud para los Pirineos.

8.4.1 Elección de la comunidad vegetal objetivo.

Del estudio fitosociológico en la zona de Claror, obtuvimos que los pastos aladaños a la zona erosionada por las lavas torrenciales se correspondían con la **comunidad vegetal de *Festucion eskiae***. No fue ninguna sorpresa, puesto que, en los estudios pastorales de diferentes zonas del Pirineo, se trata generalmente de la comunidad vegetal que más superficie ocupa entre el estrato subalpino y alpino.

La alianza de *Festucion eskiae*, figura en la lista de hábitats de interés comunitario europeo. Estos pastos, se caracterizan por una gran dominancia de *Festuca eskia*, que es casi exclusiva en terrenos de gran pendiente. Se trata de una gramínea de hojas punzantes que en las vertientes inclinadas consolida suelos deslizantes y dificulta la solifluxión formando microterrazas que siguen más o menos las curvas de nivel, viéndose éstas potenciadas en forma de caminitos con el paso del ganado. Aunque el potencial de control de la erosión por parte de esta planta no está todavía estudiado a nivel científico, conceptualmente se puede interpretar que esta particularidad de generar microterrazas, como si de un cultivo a nivel se tratase, le confiere todavía un mayor control de la erosión por incremento de los factores L (longitud de la pendiente, microterrazas) y P (prácticas de conservación, cultivo siguiendo las curvas de nivel) en la RUSLE. Ninguna otra especie del Pirineo que colonice en altitud y en pendiente pronunciada, genera este efecto protector contra la erosión como lo hace *Festuca eskia*. Efectivamente, de la vegetación inventariada en los terreros a revegetar, encontramos también: *Ranunculus parnasifolius* (ranúnculo de pedregal), *Viola diversifolia* (pensamiento alpino, endémica), *Gentiana acaulis*, y *Galeopsis ladanum sp pirenaica*. Por lo general, se trata de plantas con raíces pivotantes, o de poco alcance horizontal, de manera que ninguna de ellas ejerce control sobre la erosión en las zonas de fuerte pendiente, a lo sumo inician la incorporación de materia orgánica en el suelo, facilitando la posterior entrada de *Festuca eskia*.



Figura 7: Notar la extraordinaria proporción de raíces fasciculadas de una sola mata de *Festuca eskia*, adaptadas a la pendiente protegiéndola de la erosión hasta por lo menos 1 m aguas arriba, y en como la planta ha retenido el sedimento con las hojas, y evitado la progresión del reguero con las raíces, que justo después, este alcanza ya unos 50 cm de profundidad. Esta vertiente tiene una inclinación de 30°.

Esta comunidad vegetal es la de mayor crecimiento vegetativo en altitud (entre 2.000 y 4.000 kg/MS/ha/año). Se encuentra generalmente a partir de los 1.900 m s.n.m., colonizando laderas con pendiente de hasta 34° (talud 3H/2V), y sobre suelo ácido, incluso en zona de roca madre calcárea, siempre y cuando por lixiviación de bases el suelo se haya acidificado.

La apabullante dominancia florística de *Festuca eskia* en los pastos de la zona, y el hecho de que ésta sea prácticamente la única especie capaz de colonizar con elevado recubrimiento y prácticamente en solitario los suelos más pobres y de mayor pendiente, nos condujo a “arriesgarnos” a probar con el monocultivo de la misma. Cabe decir en complemento, que además se trata de una planta rústica muy bien adaptada al rigor del clima de alta montaña, poco exigente en nutrientes y agua, de reproducción vegetativa predominante, y de bajo valor pastoral. De hecho, se trata de un **endemismo pirenaico**.

Si bien nos planteamos acompañarla en las zonas más llanas con *Trifolium alpinum*, por la sinergia que genera la fijación de N por parte de la leguminosa, por su mayor apetecibilidad y para dar mayor valor nutritivo al pasto, finalmente la idea fue abandonada por la urgencia en la realización de los trabajos, y porqué presumimos que hay grandes posibilidades de que vaya entrando sola en las zonas más llanas, una vez la erosión esté controlada, siempre y cuando haya una presión de pastoreo suficiente.

8.4.2 Recolección y preparación de la semilla.

En la actualidad no existe ningún productor de semilla local de *Festuca eskia*. Nos consta que en el Pirineo francés se intentó la producción de grano para la obtención de semilla local, pero sin éxito.

En 2015 procedimos a la recolección manual de semilla para la realización de un ensayo preliminar en dos parcelas experimentales. **El rendimiento de los operarios en la recogida manual de *Festuca eskia* oscila entre 0,5 y 1 kg/día/persona, con una pureza que oscila entre el 55 y el 85%, según habilidad del operario y disponibilidad de grano. El peso de 1.000 semillas (P_{1000}) oscila mucho, con lotes entre 0,65 y 1,2 g, con un valor medio de $P_{1000} = 0,8$ g.**

Teniendo en cuenta el bajo rendimiento en la recolección manual de semilla obtenido para el ensayo preliminar, para 2016 se pudo contar además con los servicios de **recogida mecanizada, obteniendo un rendimiento aproximado de 7 kg semilla/día** (ver figura 8). Pero en este caso, la pureza está entre el 35 y el 50%, pues la semilla recolectada incorpora un elevado % de impurezas como insectos (principalmente saltamontes), restos de estructuras florales y paja, en comparación a la recogida manual. **El $P_{1000} = 0,5$ g en promedio para la recogida mecanizada**, fue del orden del 35% inferior al de la semilla recogida manualmente. Se desconoce el motivo, y si este hecho afecta a su potencia germinativa. Por todo ello, de momento **no resulta evidente que la cosecha mecanizada sea mucho más eficiente que la manual.**



Figura 6: Recolección manual y mecanizada de semilla de *Festuca eskia*.

La semilla se **cosecha entre mediados y finales de agosto**, aunque según la fenología del año en cuestión ésta se puede adelantar o atrasar alrededor de una semana. Se debe tener en consideración que, a partir de principios de setiembre, momento en que empieza la diseminación anemócora, si hay viento, la recolección fracasa. Una vez recolectada, la semilla se debe secar e intentar purificar por encima del 75% para poder controlar mínimamente las dosis de siembra. El secado, en habitación ventilada puede durar entre 15 y 30 días.

Previamente al ensacado, se debe proceder al muestreo por separado según las diferentes procedencias y fecha de recolección para el cálculo del peso de 1.000 semillas (P_{1000}), y de la pureza (p), mediante pesaje de precisión. Se recomienda reservar una pequeña alícuota de semilla de cada lote para la realización de ensayos de germinación (g), y así poder calcular a posteriori los valores del coeficiente de cultivo (K) mediante los correspondientes ensayos de potencia germinativa a fin del primer ciclo de cultivo en condiciones de campo (G), para ir generando un banco de datos que facilite la realización sistemática de siembras a futuro, en base solamente a la realización de ensayos de germinación en laboratorio (por la gran variabilidad observada), omitiendo a futuro los costosos ensayos de potencia germinativa en condiciones de campo y la pérdida de tiempo que supone la realización de ensayos previos.

El **coste aproximado**, para la recolección, secado, purificación manual, y el ensacado (identificando lotes por procedencia y fecha de recolección), está **comprendido entre 900 y 400 €/ kg de semilla de *Festuca eskia* pura**, según sea la recolección manual o mecanizada, respectivamente. **Utilizando el método Claror para el dimensionamiento de las necesidades de semilla, obtuvimos un coste promedio de obtención de semilla de 6.300 €/ha** (Andorra, año 2016).

8.4.3 Ensayo previo de potencia germinativa en condiciones de campo (G).

Festuca eskia, como especie salvaje que es, y por su comportamiento de reproducción vegetativa predominante mediante ahijamiento, tiene una gran variabilidad de éxito en cuanto a sus condiciones de reproducción sexual, por lo que hasta que no se pueda caracterizar razonablemente

bien sus propiedades germinativas y de éxito en el establecimiento de la plántula en condiciones de campo (parámetros g y k), **para una siembra a gran escala, se debe proceder a realizar un ensayo previo en condiciones reales de la zona a restaurar para ajustar los parámetros de siembra** a fin de obtener la densidad de plántulas deseada a fin del primer ciclo vegetativo.

Efectivamente, **para el ensayo de potencia germinativa en condiciones reales de campo (G), obtuvimos valores comprendidos entre: $5\% < G < 20\%$** , según procedencia de la semilla (altitud, orientación, y zona), época de recolección, tipo de suelo y densidad de siembra. En referencia a este último aspecto, comentar que, para densidades de siembra altas o muy altas, se constata a fin del primer ciclo vegetativo una mortalidad incluso superior al 50% de las plantas emergidas en los primeros conteos, ello a causa de la competencia interespecífica. Por ello, **preconizamos la realización de siembras a muy baja dosis, para aprovechar el gran potencial de reproducción vegetativa de la especie**, pues de una sola semilla puede emerger una planta que en pocos años acabará generando una macolla de entre 15 a 40 cm de diámetro, incluso en algunos casos mayor.

8.4.4 Siembra. Diseño y aplicación.

La siembra se hizo sobre terreno fertilizado previamente mediante redileo (ver apartado 5.3). También es posible realizar una fertilización mediante un abono organomineral si la primera opción no estuviere disponible.

En cuanto al **momento de la siembra**, la duda estaba en si esta debía de realizarse en primavera o en otoño. En base al desconocimiento de los requerimientos fisiológicos de germinación de la semilla de *Festuca eskia*, como las eventuales necesidades de vernalización, de escarificación del tegumento por semilla dura, de imbibición anticipada durante la fusión de la nieve para escapar a las olas de calor post fusión los años con mucha innivación, etc., de manera que lo más razonable consideramos que sería imitar a la naturaleza (NBS), con un pequeño desfase, sembrando en otoño **a finales de octubre**, justo antes de las primeras nevadas, ello con doble objetivo: por una parte se trata de limitar el riesgo de comida de semilla por pájaros e insectos, y por otra parte para evitar una eventual germinación anticipada en caso de temperaturas favorables en setiembre, que eventualmente podrían provocar germinación, llevando a la plántula a inicios de invierno sin haber empezado el ahijamiento, que es cuando las gramíneas cobran resistencia a las heladas.

En referencia a la **dosis de siembra**, también se buscó imitar a la naturaleza para favorecer el crecimiento vegetativo propio de la especie mediante bajas dosis de siembra, sinérgico con la necesidad de ahorrar semilla por su elevado coste de obtención. Aunque en este caso, teníamos además otro objetivo prioritario que atender que va en dirección contraria: el rápido control de la erosión, que nos obligaba a buscar recubrimientos importantes ya desde el primer año para controlar la erosión por salpicadura y la laminar. La solución de compromiso se encontró para una **siembra con $N = 200$ plantas/m²** (plantas viables a fin de primer ciclo vegetativo), que se

corresponde con una equidistancia entre plantas de 7 cm, o sea, a 14 macollas por metro lineal. Teniendo en cuenta que las macollas a fin del primer ciclo vegetativo en la parcela experimental 2015 fertilizada mediante redileo tenían por término medio 1 cm de diámetro en la base, entonces sembrando a bandas siguiendo las curvas de nivel, para el metro sembrado, en sentido de la máxima pendiente, el agua de escorrentía se encontraría a lo largo de su recorrido del metro sembrado unas 2 macollas por término medio, que debería sortear, reduciendo por tanto su velocidad, al mismo tiempo que la carga potencial de sedimento, dificultando así el inicio de regueros de erosión ya que no se les facilita el desarrollo natural siguiendo la línea de máxima pendiente. En complemento, cabe decir que las macollas tenían un diámetro medio de aparato foliar denso de unos 3 cm, lo que significa que a fin del primer año se consigue un recubrimiento del 15% frente a la erosión por salpicadura.

Mediante la siembra a bandas, metro sembrado y metro yermo, siguiendo las curvas de nivel, se consigue ahorrar el 50% de la semilla, por lo que la dosis efectiva de siembra se queda en 100 plantas/ m². Las bandas no sembradas, se autosiembran a partir del segundo ciclo vegetativo desde sus vecinas, consiguiendo un recubrimiento alrededor del 20% a los 5 años post siembra, por el 70% en la banda sembrada, ello sin realizar ninguna operación de mantenimiento posterior a la siembra (por motivos políticos).

Considerando la gran diferencia de pureza y peso de 1.000 granos para la semilla recolectada, para poder conservar una adecuada homogeneidad alrededor de las 200 plantas/m², **la siembra debe ser realizada preparando en saquitos con cierre zip las dosis pesadas con precisión que se calculan para una determinada longitud de banda a sembrar.** Por tanto, los operarios deben trabajar con cintra métrica, piquetes, y cordeles de referencia, marcando las bandas a sembrar con ayuda de puntos de pintura sobre el terreno. Es imprescindible que el director de obra asista por lo menos al principio de la realización de la siembra para ayudar a que los operarios cojan la sistemática del procedimiento de siembra del método Claror.

La semilla se debe proteger de la erosión mediante un mulch de paja que, en otoño, con la humedad del rocío nocturno, se fija rápidamente al suelo y soporta bien los vientos. Empleamos una **dosis de 2.500 kg/ha sembrada.** En las bandas no sembradas tampoco se aplicó mulch bajo la hipótesis que la banda de aguas abajo protegida con paja, retendría la eventual aportación de sedimentos de la banda no protegida, por lo que la dosis efectiva de paja, en realidad se reduce a la mitad (1.250 kg/ha). Quizás se pueda reducir todavía más, aunque debería verificarse experimentalmente. Con esta dosis de paja, se protege el suelo hasta bien entrado el ahijado de la gramínea, momento a partir del que ya no lo necesita. La paja, con ayuda de los nutrientes aportados por el estiércol de ovino, se descompone hacia finales del primer ciclo vegetativo. No se puede usar mulch de paja si no se aplica el fertilizante orgánico, puesto que la elevada relación C/N de ésta, estresaría a la joven plántula al dejarla sin N disponible.

A nivel de estudio preliminar, se puede contar para la realización de la siembra manual, según el procedimiento indicado, con 10.000 €/ha aproximadamente (Andorra, año 2016). No

incluye la fertilización. Si incluye la aplicación del mulch, la siembra manual a bandas, más el transporte del mulch de paja, semilla, personal, comida, y herramientas mediante helicóptero (26 €/min.) hasta la zona de trabajo (a unos 1.200 m de desnivel por encima del helipuerto), para una jornada laboral de 10h y rotaciones de helicóptero de 15 a 25 minutos, según carga.



Figura 9: Siembra a bandas (metro sembrado, metro yermo), con mulch de paja, siguiendo las curvas de nivel.

8.4.5 Posibles problemas y eventuales soluciones. Aprendizaje.

- A. La siembra sobre suelo procedente de procesos erosivos recientes, sin nutrientes ni materia orgánica, aunque sea de una planta rústica y adaptada al medio como *Festuca eskia*, sin fertilización no funciona.** A partir del inicio del ahijado los requerimientos nutritivos mínimos no pueden ser satisfechos, con lo que el fracaso está asegurado. No obstante, se considera factible esperar al ahijado para aportar entonces el abonado de cobertura, ahorrando así las pérdidas de N a causa de la lixiviación provocada por la fusión de la nieve, en referencia a la fertilización mediante redileo durante el verano anterior y siembra en otoño, que es lo recomendado. En referencia a las parcelas experimentales, los resultados con fertilización mediante redileo con ovinos (ovinatorremediación) fueron espectaculares (ver figura 10), pues a final del segundo ciclo vegetativo se obtuvo un aspecto de la parcela “asimilable” a los pastos naturales, incluso con floración y producción de semilla.
- B.** En la zona de mayor pendiente de la siembra a gran escala, la nascencia 2017 fue buena, pero la falta de fertilidad debida al hecho de que las ovejas rechazan las zonas más pendientes para dormir, provocó mortalidad de plántula y el fracaso de la revegetación en estas zonas. Se considera que, **para las zonas de pendiente elevada, el problema de la irregularidad de la aportación de fertilizante por parte de los ovinos, se podría solucionar mediante abonado manual** (ver apartado 5.4).



Figura 10: Parcela experimental de 16 m² fertilizada mediante redileo. Estado a fin del segundo ciclo vegetativo. Los alrededores, yermos de vegetación, se corresponden con la prueba en blanco.

- C. Mediante la ayuda de una sonda de temperatura superficial de suelo pudimos determinar la duración de la innivación para el inicio del primer ciclo vegetativo, y la proximidad de la estación de Perafita, situada en las cercanías de la zona de estudio y a la misma altitud, nos ha permitido realizar un seguimiento de las temperaturas, precipitaciones y espesor de nieve durante los diferentes años de estudio (2016, 2017 y 2022), de manera que la elaboración de estos datos nos ha facilitado la obtención de un esbozo en forma de primera aproximación a **la integral térmica a los diferentes estados fisiológicos de interés para *Festuca eskia* en condiciones reales de campo**. No se dispone de datos para el encañado, espigado, y maduración del grano, este último de gran interés para la recolección de la semilla, aunque si se dispone de las fechas aproximadas más adecuadas para la cosecha del grano (ver apartado 7.4.2).



Figura 11: Inicio del segundo ciclo vegetativo para la siembra a gran escala ajustada para obtener 200 pl/m². Las dosis de siembra habituales para revegetación en altitud mediante hidrosiembra, entre 200 - 300 kg/ha son francamente mejorables, pues las hemos reducido en más de 20 veces, mediante un enfoque razonado en base a fijar una densidad objetivo de plantas/m² aplicando el **método Claror** (ver apartado 7.3).

Para el sumatorio de los grados-día, se ha considerado que el cero vegetativo para esta planta de altitud se corresponde con los 0 °C, asimilándolo a buena parte de los cereales de invierno.

Tabla 1: Integral térmica preliminar en condiciones de campo con fertilización de los estados fisiológicos de interés para *Festuca eskia*. Los valores vienen expresados en grados-día, considerando el cero vegetativo situado en 0 °C. Obtenidos a partir de datos meteorológicos de 2016, 2017 y 2022 de la estación automática de Perafita, situada a 2.402 m s.n.m, a 2,2 km de la zona de estudio.

Estado fisiológico	Germinación Radícula emergida	Plántula ≤ 3 hojas	Inicio ahijado ≥ 4 hojas	Fin 1º ciclo vegetativo
--------------------	----------------------------------	--------------------	--------------------------	-------------------------

Estos valores, deben ser considerados orientativos para que los técnicos que trabajen en revegetación con *Festuca eskia* dispongan de una ayuda que les sirva para planificar actuaciones clave como abonados de cobertura, análisis foliar, recolección de semilla, entre otros, y también para programar la realización de visitas de campo de verificación del desarrollo de la vegetación y toma de muestras. Este conocimiento preliminar, debería ser mejorado y precisado mediante estudios específicos con rigor científico. Es importante tener en cuenta que se observaron diferencias muy notables a partir del estadio de plántula (3 hojas verdaderas) para las parcelas no fertilizadas, y para la siembra de finales de primavera.

- D.** MONTCLIMA adjudicó a SILVAGRINA, mediante concurso internacional, la realización de un ensayo de campo a gran escala (de 5.500 m²) en noviembre 2021. El ensayo, tenía por objeto continuar investigando para afianzar la técnica de revegetación empleada a fin de poder disponer de una referencia a gran escala con una estrategia concreta que proponer a la región SUDOE, para cuando ocurran lluvias torrenciales catastróficas en cuencas de montaña similares.

La propuesta retenida, consistía en abordar la revegetación de los terreros de fuerte pendiente de la parte superior de la cuenca que inicialmente (2015 y 2016) no habían sido sembrados por no estar suficientemente regularizados (ver imagen de portada). Mediante esta revegetación para el control de la erosión a base de *Festuca eskia*, se pretendía analizar la factibilidad de reducir las densidades de siembra usadas en 2016 con la intención de rebajar los costes de obtención de la semilla local (el principal factor económicamente limitante, ver apartado 7.4.2). La idea consistía en compensar la reducción de dosis de siembra mediante abonado, principalmente nitrogenado (N), puesto que es conocido que en los cereales existe un efecto compensatorio entre ambos insumos de producción en relación a la cosecha de grano. Es decir, **cabe esperar que, reduciendo la densidad de siembra, pero incrementando la fertilización nitrogenada,**



Figura 11: Siembra experimental a bandas en primavera 2022 de los terreros erosionados. Se generó 65 parcelas de 30 m² cada una, probando para diferentes densidades de siembra y separaciones (para la banda no sembrada). Como prueba de la eficacia de la ovinorremediación compárese esta fotografía con la de la portada, llena de profundas cárcavas. Se trata de la misma vertiente, una vez regularizada mediante pisoteo de ovejas, ya apta para la siembra.

se incremente el ahijamiento, la producción de espigas, y de grano por planta, hasta compensar la producción que se obtendría con menor dosis de N, pero con mayor densidad de siembra.

Mediante la siembra a bandas, se busca en una primera etapa un rápido control de la erosión, y en una segunda etapa la auto-siembra de las bandas dejadas yermas al menor coste posible. Por tanto, interesa potenciar el crecimiento vegetativo mediante fertilización para maximizar la resiembra natural limitando las necesidades de recebado, abaratando así los costes de cerrar la cubierta herbácea. Para este menester, se realizó análisis de suelos de la situación inicial (terrero yermo) y de la comunidad vegetal objetivo (suelo de *Festucion eskiae*). El análisis de suelo permite decidir sobre los tipos y dosis de fertilizante más interesantes a ensayar.

Se constata que los dos tipos de suelo son ácidos y pobres en nutrientes, con la salvedad de que el fosforo preexistente ha sido extraído por los herbívoros, no siendo necesaria fertilización fosfórica. La diferencia fundamental, como cabía esperar, estriba en el contenido en materia orgánica que se acumula en estos rankers de altitud, por

falta de descomposición a causa del frío. **Mediante la vegetalización de estos suelos yermos, se constata una potencialidad de incremento del 4% en el contenido de materia orgánica del suelo (200 t/ha), equivalente a fijar 460 t CO_{2eq.}/ha, lo que podría comportar la posibilidad de autofinanciación en proyectos de restauración mediante créditos de carbono,** como veremos más adelante.

En referencia a la siembra realizada por SILVAGRINA, comentar que ésta no se pudo realizar en otoño por causa de nevadas anticipadas que impidieron el acceso a la zona de siembra, por lo que la desplazamos entre finales de mayo y principios de junio 2022, enseguida que la fusión de la nieve lo permitió. Sospechábamos que por selección natural podría ser que la semilla de *Festuca eskia* requiriese de los ciclos de hielo-deshielo que se producen en su biotopo de forma natural durante otoño, y que éstos podrían ser necesarios para escarificar la semilla, o facilitar cualquier otro requisito fisiológico previo a la germinación. Esta estrategia naturalmente seleccionada, tendría su razón de ser para que la semilla no germine anticipadamente en otoño y sucumba la plántula a las heladas, por no disponer de *grados día* suficientes para llegar a la fase de ahijamiento antes de las potentes heladas de final de otoño. Por ello, a la mitad de la semilla que MONTCLIMA puso a nuestra disposición para la siembra, la sometimos a diversos ciclos de hielo/deshielo en congelador.

Pues bien, **para la siembra 2022, se constata un fracaso absoluto en la germinación, pues únicamente ha habido nascencia testimonial de la semilla escarificada mediante ciclos congelación-deshielo.** La semilla continúa enterrada en aparente buen estado de conservación, haciendo posible la germinación en 2023. Se propone las siguientes **hipótesis explicativas del fracaso de la germinación 2022:**

1. Se hizo siembra de finales de primavera, fuera del ciclo natural: sin ciclos hielo-deshielo en otoño que podrían ayudar a escarificar el tegumento, y sin imbibición durante la fusión de la nieve (acelera la germinación).
2. Que la semilla disponible fuese inviable por la sequía del verano 2021. En comparación a 2015 y 2016, hubo muy poca producción de semilla y esta tenía un peso de 1.000 granos bajo.
3. Posible superación de la temperatura máxima de germinación por causa de la ola calor en junio, que se dio además con inversión térmica (a 2.400 m con T^a mín.>14°C, y T^a máx.>20°C), agravada por sequía, y el hecho de que la vertiente es negra y además está orientada al SE.

Del fracaso 2022, obtenemos el siguiente **aprendizaje:**

- A. Los éxitos de 2015 y 2016 generaron una cierta euforia que debe ser contenida para limitar el riesgo de fracasos de revegetación a gran escala, si esta técnica se populariza. Preventivamente, se **debería profundizar en el estudio de las**

necesidades agro-ecológicas de *Festuca eskia* y realizar más ensayos en condiciones diferentes, antes de promover su utilización masiva en el control de la erosión en altitud.

- B. Las olas de calor y sequía por cambio climático comprometerán la revegetación en altitud. **En el supuesto que el CC provoque regresión en la potencia germinativa del banco de semillas del suelo de la única cubierta vegetal de altitud en suelos ácidos de fuerte pendiente, que es capaz de controlar la erosión (*Festucion eskiae*), entonces ingentes cantidades de material erosionable quedarían expuestas en los Pirineos. Las hipótesis de diseño de infraestructuras hidráulicas y la zonificación de riesgos geológicos quedarían obsoletas, y deberían sustituirse en algunos casos por el estudio de lavas torrenciales, mucho más destructivas, que podrían llegar al fondo de valle. Además, el incremento de la erosión comportaría que los cauces fluviales en zona urbana se colmatarían de sedimento y desbordarían.**
- C. Se considera que preventivamente se debería sistematizar el estudio y seguimiento de la evolución del manto vegetal protector en zona altamente erosionable de los Pirineos.



Figura 13: Ejemplo de erosión remontante y posterior colonización remontante en algunas vertientes no excesivamente inclinadas.

- E. Nos preocupa la **formación de agujas de hielo (pipekrake), en la zona más húmeda y sombría, que levantando la capa superficial del suelo, causa rotura de raíces**. Este fenómeno singular podría explicar la elevada proporción de suelo desnudo con pendiente moderada y no erosionado que hay en la zona.
- F. También se observa erosión remontante en algunas laderas de la zona (ver figura 13). Posiblemente provocadas por el ganado en su inicio, y magnificadas posteriormente por formación de agujas de hielo en la base de la cornisa, desestabilizando las matas de *Festuca eskia*, las que se derrumban y mueren. Observando este fenómeno, descubrimos **otra potencialidad de *Festuca eskia*: la de poseer la capacidad de realizar colonización remontante**. El nuevo pasto va tapizando desde la base en sentido ascendente el talud yermo mediante siembra y reproducción vegetativa. No obstante, se pierde alrededor de 1 m de espesor de suelo durante el proceso de autoreparación natural.
- G. La propuesta metodológica de restauración de esta guía de actuación, se concibió en condiciones de urgencia, improvisando soluciones basadas en la naturaleza, por una parte porque esta zona dispone de una figura de protección de Paisaje Cultural de la UNESCO, pero sobretodo porque las medidas mecánicas de restauración son inabordables por factibilidad y costes. De manera que resultaba imperativo realizar actuaciones para minimizar los cortes en el suministro de agua potable. Por tanto, en la contratación no tuvimos ninguna indicación en cuanto a limitación de tecnología, ni de costes por parte de los políticos que nos contrataron: *"hagan ustedes lo que haga falta para que no vuelva a haber nuevos cortes de subministro. Un país que vive del turismo como Andorra, no se lo puede permitir a nivel de imagen"*. Por tanto, la propuesta retenida, fue solamente técnica sin análisis económico ni presupuesto. El cálculo de costes unitarios se ha hecho a posteriori, obteniendo para los trabajos de revegetación mediante *Festuca eskia*, aplicando el método Claror, los siguientes costes (ver apartados 5.3, 7.4.2, y 7.4.4):

1. Fertilización a 3 años mediante redileo, a 9.000 €/ha.
2. Obtención de semilla (recolección, secado y ensacado), a 6.300 €/ha.
3. Realización de la siembra manual, incluida la aplicación del mulch de paja, helitransportando el material y el personal, a 10.000 €/ha.
4. Coste total de siembra y fertilización: 25.300 €/ha (2,5 €/m²).

Jamás de los jamases nos imaginamos que este tipo de siembra experimental en base a la aplicación del método Claror al monocultivo de *Festuca eskia*, fertilizada mediante redileo a 3 años, estaría al mismo nivel de competitividad de costes que las hidrosiembras comerciales, usando semilla no local y abonado organomineral, en pistas de esquí, vertederos y taludes de carretera en condiciones de ejecución medias a difíciles, con garantía solamente de 1 año (entre 2 y 3 €/m²). En cuanto a la competitividad cualitativa desde los puntos de vista: ecológico, del control de la erosión, garantías de éxito a largo plazo, y de la generación de mano de obra, el método Claror, no admite comparación posible.

8.5 Seguimiento y pilotaje de los trabajos de revegetación.

Según nuestra experiencia, **los trabajos de seguimiento y pilotaje de la revegetación deben proseguir al menos entre 5 y 8 años post siembra**, reduciendo la intensidad del seguimiento a medida que se va produciendo la colonización con vegetación autóctona y se observa un buen comportamiento de la zona sembrada en comparación a la vegetación natural de los alrededores. No deben los gestores confiarse de un buen desarrollo vegetativo en alguno de los 3 a 5 primeros años, ya que los niveles de materia orgánica, estructura, porosidad, microbiota y fertilidad del suelo todavía estarán lejos de su valor de equilibrio a largo plazo, el que se alcanzará en el clímax de la sucesión vegetal, de manera que pueden aparecer debilidades a posteriori de un año con buena producción de biomasa.

El pilotaje o acompañamiento del desarrollo de la vegetación a partir del segundo-tercer ciclo vegetativo suele ser el gran olvidado por los gestores de la alta montaña, a pesar de que tiene mucha transcendencia en el éxito final. Por lo general, el pilotaje es muy económico en comparación con la implantación inicial, generalmente por debajo del 25% del coste de la siembra inicial, a la vez que es muy rentable porque limita los fracasos a largo plazo, por pérdida o compactación del suelo.

Por lo general, el mantenimiento se limita a prestar atención a los siguientes factores por orden de importancia:

1. Si bien para el primer ciclo vegetativo post siembra, es habitual tomar medidas para evitar que el ganado pastoree las zonas recién sembradas, no lo es para el segundo ciclo vegetativo, en que las plantas todavía están construyendo su sistema radicular y pueden ser fácilmente arrancadas de raíz al ser comidas o pisoteadas, especialmente en condiciones de terreno húmedo. **El ganado ha arruinado muchas revegetaciones inicialmente exitosas. Se debe intentar pactar con ganaderos y pastores el respeto de estas zonas recién sembradas, y conseguir su colaboración para que en la medida de lo posible destinen sus efectivos ganaderos a otras unidades de pastoreo.** Si necesario, se debe indemnizar a los ganaderos a condición de que a final de temporada la zona vegetalizada haya sido respetada. En algunos casos también funciona contratar al pastor para que se responsabilice de la gestión de las cercas (habitualmente eléctricas con placa solar y batería), que deben ser utilizadas durante los 2 primeros años, a pesar de que al final del segundo año, si el suelo está seco, se puede ofrecer la producción herbácea a los animales, pero con baja carga ganadera y supervisión del pastor sacando el ganado si el perfil edáfico se humedece al punto que se marque el pisoteo. En caso de pastoreo con bovino y equino, se recomienda esparcir las boñigas para que no ahoguen a la vegetación en la zona de deposición, y a la vez repartir el estiércol a su alrededor para una más eficaz y homogénea fertilización de la parcela a restaurar.

2. **Si se controla el riesgo de daños por el ganado, la mayor atención en el pilotaje de la evolución de la recolonización vegetal se debe centrar en la fertilización.** En altitud, los suelos de los pastos naturales acumulan grandes cantidades de materia orgánica, alrededor del 5%, lo que significa que se dispone de un gran almacén de nutrientes que son liberados progresivamente a la solución del suelo mediante mineralización, y las plantas los aprovechan en su fase de crecimiento vegetativo. La materia orgánica del suelo a final de temporada se retroalimenta con los restos de hojas y raíces senescentes, más los excrementos de los animales que la pastorean. Se establece así un equilibrio cíclico a largo plazo que asegura la fertilidad del suelo. Por el contrario, **en la revegetación de suelos yermos, si además son “estériles”, se deberá aportar fertilizantes N-P-K hasta que se genere un mínimo de materia orgánica en el suelo que permita “cerrar” el ciclo de los nutrientes y se pueda retroalimentar a sí mismo generando estabilidad.** Si hay facilidades de acceso a la zona, se recomienda utilizar un abono organomineral por su aportación complementaria de Mg, microelementos, microorganismos y materia orgánica que reactivaran la vida microbiana del suelo, ideal para aplicar mediante hidrosemebradora. En los lugares de difícil acceso, para limitar los costes del transporte y distribución, la fertilización se deberá orientar a la de tipo mineral, preferiblemente de liberación lenta, incluso se puede realizar mediante helicóptero en base a solución fertilizante esparcida con barra de tratamientos, opción recomendada en fuerte pendiente ya que se infiltra directamente en el suelo. También se puede helitransportar los sacos, que se esparcirán manualmente. Las dosis se calcularán de forma similar al momento de la siembra, en base a los análisis de suelos disponibles que deberían ser previos a la siembra, comparando la riqueza en nutrientes de la zona desnuda a sembrar con los de la situación clímax de los pastos aledaños (objetivo a largo plazo), aunque se ajustarán a dosis decrecientes para facilitar la entrada de la vegetación autóctona, si no la hubiéremos utilizado para la siembra. La dosis de fertilizantes se calculará según el estado de la vegetación protectora sembrada, y la detección de carencias por interpretación visual de experto. Si posible, además se completará mediante ayuda del análisis foliar y estimación de la producción de materia seca por hectárea.
3. En zonas ya revegetadas, si el espesor de suelo y la red de drenaje superficial lo permiten, normalmente se habrá ejecutado cunetas “perpendiculares” a la línea de máxima pendiente, para el control de la erosión a lo largo de la vertiente. En estos casos, **se debe prever recursos suficientes para repasar manualmente o mecánicamente los daños que hayan podido provocar en las cunetas de control de la erosión las tormentas de verano y la fusión de la nieve.**
4. En algunos casos menos exitosos, se debe proceder a la resiembra de los rodales con calvas de vegetación que, según el caso, puede incluso realizarse manualmente protegiendo con mulch de paja, o heno de la misma zona, si está disponible en las cercanías.



9. Prueba en blanco

Aunque la restauración no tenga finalidades de investigación, **en la medida de lo posible, siempre resulta interesante dejar una pequeña zona testigo, que llamamos prueba en blanco** (ver figura 14), sin tratamientos, para tener una referencia con la que comparar las estrategias de control de la erosión empleadas, y poder así sacar conclusiones de aprendizaje. También, y no menos importante, para poder hacer pedagogía empírica demostrando las bondades de la aplicación de las NBS en restauración ambiental, especialmente a los gestores y políticos responsables del monte.

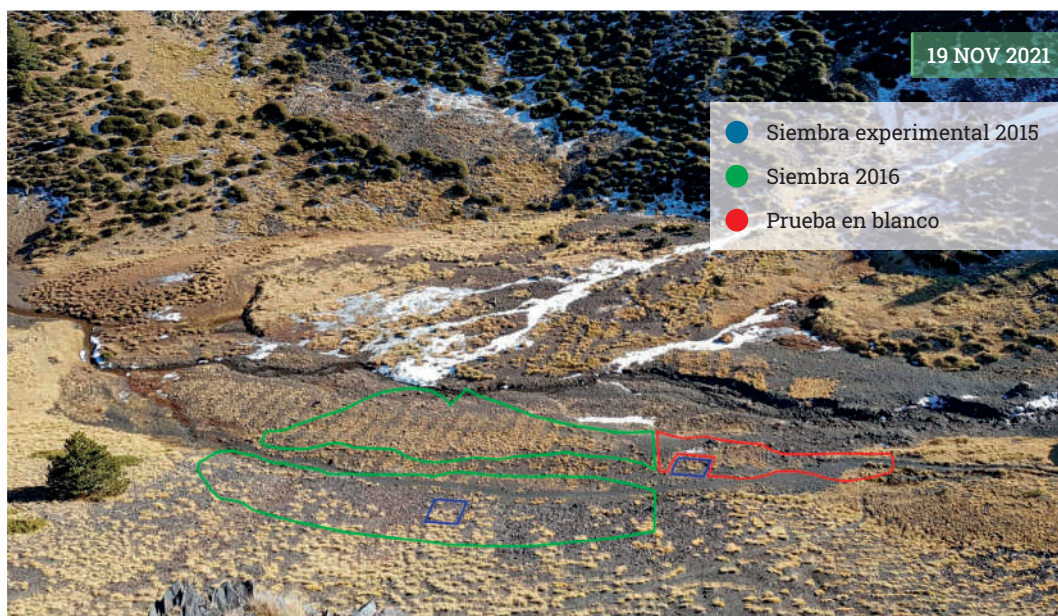


Figura 13: Revegetación en el cono de deyección donde se depositaron los sedimentos de las lavas torrenciales, representa 1/3 del total sembrado. Nótese las bandas de siembra (metro sembrado, metro yermo), que están con un recubrimiento del 70% en la zona sembrada y del 20% en la no sembrada 5 años después, sin haber realizado ningún mantenimiento posterior. La parcela dejada como prueba en blanco continua yerma (< 5% recubrimiento), 7 años después de la catástrofe, con unas pocas matas de *Festuca eskia* y algunas plantas anuales con raíces pivotantes, sin prácticamente capacidad de contribuir al control de la erosión.

Conclusiones

El incremento por cambio climático (CC) de la frecuencia e intensidad de las olas de calor, sequías, tormentas violentas e incendios, va a debilitar las cubiertas vegetales en altitud, lo que se traducirá en un aumento de la erosión en cabecera de cuenca, incrementando la vulnerabilidad en los conos de deyección y en las riberas de los fondos de valle Pirenaicos. La vida útil de las actuales infraestructuras hidráulicas (puentes, canalización urbana de ríos, captaciones de agua, presas, etc.) ya ha quedado comprometida, pues en su día fueron diseñadas para períodos de retorno (T) calculados en base a la ocurrencia de precipitaciones extremas en hipótesis de clima regional estable, hipótesis que ha quedado obsoleta por CC, según los estudios de proyección mediante modelos climáticos del IPCC.

Es bajo este contexto, que se ha elaborado la presente guía de actuación, aprovechando como hilo conductor los trabajos realizados en la cuenca del torrente de Claror (Andorra), para mitigar los efectos que una tromba de agua (71 mm/h de intensidad horaria punta) en cabecera de cuenca tubo sobre la captación superficial de agua potable de Les Escaldes-Engordany que, por turbidez extrema (>500 NTU), ocasionó frecuentes cortes del subministro de agua potable. Poco importa si este fenómeno en particular puede o no ser atribuido directamente al CC, de lo que se trata es que este tipo de fenómenos será cada vez más frecuente, y colectivamente deberíamos anticipar estrategias para hacerles frente.

Para el control de la erosión en estas zonas de fuerte pendiente situadas a gran altitud, el factor clave es la rápida revegetación, pues el suelo desnudo y estéril que queda expuesto después de un evento erosivo intenso, es por lo menos 100 veces más erosionable que el mismo suelo si está totalmente recubierto de herbáceas que lo protejan. No sirve cualquier cubierta vegetal, pues a esa altitud y en suelos de fuerte pendiente, la mayor parte de las especies usadas en hidrosiembra de pistas de esquí, sucumben a los pocos años, a pesar de que la fase inicial sea exitosa. Para tener garantías de éxito, se debe pilotar la evolución de la vegetación hacia la sucesión vegetal "clímax" del ecosistema local. La mejor estrategia, tanto para el control de la erosión, como para la preservación de la biodiversidad, consideramos que consiste en usar semilla local recolectada en las cercanías de la zona a restaurar. No obstante, este proceder, siguiendo las mismas prácticas de diseño de la revegetación usadas desde antaño por las empresas de hidrosiembra, en base a usar elevadas dosis de semilla (entre 200 y 300 kg/ha), no resultan competitivas en el corto plazo por la diferencia de precio entre la semilla local y la comercial, lo que frena la expansión del uso de semilla local.

Mediante la presente guía, se propone el "método Claror" como una nueva estrategia técnica para el cálculo de la dosis de siembra en base a diseño razonado con objetivo de plantas/m² a fin del primer ciclo vegetativo, mediante estrategia de vegetalización a medio y largo plazo. Entre 2015 y 2016 hicimos la primera aplicación práctica del método en base a la siembra en monocultivo de *Festuca eskia*, recolectada directamente en su biotopo. Realizando los trabajos en condiciones de extrema dificultad, mediante heliportaje del material y de los operarios, se obtuvo un

coste aproximado de 2,5 €/m². Para nuestra sorpresa, al mismo nivel de competitividad respecto a las hidrosiembras comerciales de mediana y alta dificultad (con acceso rodado, entre 2 y 3 €/m²). Ello siendo el coste de obtención de la semilla de *Festuca eskia* más de 40 veces superior. La explicación del porqué de la competitividad del nuevo método, viene dada por causa de que con mayor esfuerzo técnico, se consigue reducir las dosis de siembra (expresada en semilla pura) en alrededor de 20 veces respecto de las que se usan habitualmente en este tipo de trabajos de revegetación, y también por el uso de fertilización mediante redileo que aporta económicamente nutrientes suficientes para los 3 primeros años, y la hidrosiembra solo para 1 año.

Lo comentado en el párrafo anterior en cuanto a costes, no tiene en consideración la posibilidad de obtener financiación extra mediante venta de créditos de carbono por la fijación de CO² en el suelo que la alianza Fetucion eskiae puede proporcionar (~460 t/CO²eq./ha), lo que podría comportar la posibilidad de autofinanciación de este tipo de proyectos, que podría estar entre 1,5 y 2 €/m², (Andorra, 2022), a condición de que se utilice semilla local y se pilote hacia la comunidad vegetal "clímax", con garantías de durabilidad a largo plazo. Las autoridades ambientales, deberían analizar en detalle esta posibilidad, para que pueda ser aprovechada para certificar créditos de carbono por los responsables de la revegetación de altitud en el Pirineo.

Tenemos el convencimiento de que la cada vez mayor escasez de energía fósil, y la necesidad de reducir y/o retener emisiones de CO² a largo plazo, van a obligar a optimizar los procesos de revegetación, con mayor dedicación de recursos técnicos, mano de obra, y menor gasto energético, popularizando pues el uso de semilla local, y el método Claror.

En cuanto a las prácticas de manejo probadas en la zona de Claror para el control de la erosión, comentar muy brevemente los siguientes aprendizajes:

- A.** Los trabajos de ovinorremediación han dado resultados muy satisfactorios en armonía con el medio ambiente, y a bajo coste. Demuestran las potencialidades de integrar la actividad pastoral para conseguir sinergias con las necesidades de calidad ambiental que la sociedad actual requiere.
 - a.** Efectivamente, la compactación y la suavización de los terreros fuertemente erosionados por las lavas torrenciales (comparar la imagen de portada con la figura 12), habría sido inabordable mecánicamente, y tampoco manualmente con operarios en condiciones de seguridad.
 - b.** La fertilización mediante redileo con el rebaño de ovejas, ha sido realmente espectacular si lo comparamos con la prueba en blanco (ver figuras 10 y 14), o con el desarrollo obtenido en la parcela sin redileo (figura 3), imágenes que valen más que mil palabras.
- B.** En referencia a los microdiques de ramaje instalados dentro de las cárcavas, se comprueba que las han estabilizado, reteniendo lavas torrenciales de cierta consideración, ello sin crear interferencias con el ganado (ver figuras 5 y 6). Hasta la fecha, 6 años después, ningún microdique ha fallado y están todos rellenos de sedimento.

- C. La siembra a bandas, 1 m sembrado x 1 m yermo, siguiendo las curvas de nivel, permite ahorrar el 50% de la semilla necesaria, puesto que, a partir del segundo año, este incluido, se inicia la resiembra natural en las bandas yermas. Las fajas sembradas en 2016 tenían en 2021 un recubrimiento del 70% y las no sembradas estaban con un recubrimiento del 20% (ver figura 14). Dentro de las bandas no sembradas, no se ha observado indicios de erosión.
- D. La siembra sobre suelo procedente de procesos erosivos recientes, sin nutrientes ni materia orgánica, aunque sea mediante una planta rústica y adaptada al medio como *Festuca eskia*, sin fertilización, no funciona.
- E. Ninguna especie del Pirineo que colonice en altitud y pendiente pronunciada, protege contra la erosión como lo hace *Festuca eskia*. Hemos descubierto que además esta posee capacidad de realizar colonización remontante, en zonas sometidas a erosión remontante. Se considera que sería muy interesante realizar estudios de control de la erosión en estas pendientes a “peldaños”, protegidas por *Festuca eskia*. La reducción de costes tanto de las estaciones meteorológicas portátiles, como del empleo de la tecnología LIDAR de alta resolución, se ofrecen como herramientas muy interesantes a este propósito.
- F. La reserva de un espacio como prueba en blanco (ver figura 14), ha sido muy ilustrativo de las bondades de la estrategia de revegetación planteada, poniendo de manifiesto que, sin ayuda, los mecanismos de la naturaleza son extremadamente lentos en referencia a las necesidades que se plantean a escala humana.
- G. Como conclusión a los trabajos de control de la erosión realizados en Claror durante 2015 y 2016, cabe decir que funcionaron a satisfacción del cliente, pues desde la finalización de la construcción de los microdiques y la siembra de *Festuca eskia*, no ha habido hasta la fecha nuevos cortes en el suministro de agua potable a la parroquia de Les Escaldes-Engordany, 7 años después. Consideramos que el mayor riesgo de la aplicación de las soluciones basadas en la naturaleza (NBS) descritas, está en que puedan morir de éxito y los necesarios trabajos de mantenimiento y seguimiento no se lleven a cabo, como fue el caso en Claror, por motivos políticos.
- H. El fracaso de la siembra MONTCLIMA 2022 nos ha enseñado que, ante el desconocimiento, se debe improvisar siguiendo al máximo las NBS, pero las estrategias se pueden y deben perfeccionar mediante I+D para hacer frente a los futuros retos que impone el CC, algunos de ellos espeluznantes como, por ejemplo, que por ola de calor (como en 2022), se produzca regresión en el banco de semillas del suelo de *Festuca eskia*. Entonces, por rotura de los actuales equilibrios de erosión-transporte-sedimentación, ingentes cantidades de material erosionable en zonas de fuerte pendiente en altitud, quedarían expuestas en los Pirineos. Las hipótesis de diseño de infraestructuras hidráulicas y la zonificación de riesgos geológicos quedarían obsoletas, y deberían

sustituirse en algunos casos por el estudio de lavas torrenciales, mucho más destructivas, que podrían llegar al fondo de valle (como durante la torrentada de Claror). Además, el incremento de la erosión comportaría que los cauces fluviales en zona urbana se colmarían de sedimento y desbordarían.

Resulta por tanto urgente que los responsables de las políticas de alta montaña, pongan a disposición de los gestores un marco estratégico transnacional mediante protocolos o estrategias contrastadas para reforzar la resiliencia de los territorios del SUDOE, y que mediante líneas de financiación, asesoramiento, y facilidades administrativas no se desaprovechen estas sinergias con un VAN > 400% (inversión en preventiva vs ahorro de costes post catástrofe natural), para que la guía de actuación que se propone, y sus eventuales mejoras, estén disponibles cuanto antes para poder afrontar con perspectivas de éxito los trabajos de restauración en suelo desnudo, ya sea por catástrofe natural u movimiento de tierras de origen antrópico en alta montaña (pistas de esquí, taludes de carretera, etc.).



