



2025 | 16-20
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1329

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





LIFE TECMINE: TÉCNICAS INNOVADORAS PARA LA RESTAURACIÓN DE MINAS DE LA REGIÓN MEDITERRÁNEA

OLMO B. (1), APARICIO A. (2), GIL C. (3), MORCILLO L. (4), MARTÍN J.F. (5), NICOLAU J. (6), SANTIAGO J. (7), URIOL J. (3), VILAGROSA A. (4).

1. Red Restauración de Minas y Canteras (RMC). Av. del Oeste, 46001, Valencia, España.
2. VAERSA, Generalitat Valenciana. 46015, València, España.
3. Generalitat Valenciana, 46015, València, España.
4. Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (Fundación CEAM) Unidad Mixta de investigación, Universidad de Alicante-CEAM, 03690, Alicante, España.
5. Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid, España
6. Universidad de Zaragoza, 50009, Zaragoza, España.
7. SIBELCO, 12100, Castelló de la Plana, España.

Resumen

El proyecto demostrativo LIFE TECMINE supone un cambio de paradigma en el modelo de restauración tradicional minera explorando técnicas más eficientes e innovadoras en la gestión del agua. En este documento se describen las actuaciones realizadas durante el proyecto LIFE y el programa de seguimiento desarrollado durante periodo AFTER LIFE para evaluar el éxito de las técnicas de restauración implementadas. TECMINE se ha replicado varias veces y ha sido galardonado en los Premios LIFE 2023, fue presentado por la Unión Europea como ejemplo de restauración exitosa en la COP15 de la UN Biodiversity Conference y ha participado en la COP16 de la UNCCD. Este proyecto no se conforma con la recuperación de la vegetación de la zona, sino que su enfoque es mucho más global e integrador: persigue la recuperación de la zona restaurada creando ecosistemas totalmente funcionales.

Palabras clave

GeoFluvTM, restauración ecológica, degradación

1. Introducción

La minería en Europa es un sector estratégico clave, que abastece a otros sectores industriales de las materias primas necesarias para la producción de materiales que empleamos cada día. Sin embargo, las actividades extractivas se desarrollan a menudo sobre áreas forestales de alto valor paisajístico y ecológico, modificándolas severamente, alterando el paisaje y destruyendo la casi totalidad de los ecosistemas afectados. Únicamente en la Comunitat Valenciana existen más de 650 huecos mineros generados por actividades extractivas, de las cuales el 88% afectan a terrenos forestales. (Generalitat Valenciana, 2024).

En la región mediterránea, la elevada erosión provocada por el régimen de lluvias torrenciales es uno de los principales factores limitantes en el éxito de las restauraciones forestales. El riesgo de erosión es particularmente elevado en conjunción con pendientes acusadas del terreno, dando como resultado la aparición de una densa red de regueros y cárcavas de gran calado en las formaciones en berma-talud habitualmente presentes en paisajes post-minería restaurados. Además, existen otras limitaciones derivadas de dicho régimen



pluviométrico que condicionan el éxito de la restauración, como la inestabilidad del sustrato producida por la escorrentía que condicionará cambios bruscos en la dinámica de la vegetación, la disponibilidad de agua para las plantas, pérdida de nutrientes y pérdida de la cubierta vegetal que incide directamente en la fertilidad del suelo (Martín *et al.*, 2019).

Dado el bajo éxito observado tradicionalmente en la recuperación ecosistémica de las zonas mineras restauradas, se buscaron nuevas metodologías y técnicas adecuadas que asegurasen soluciones a corto, medio y largo plazo. En este sentido, el proyecto LIFE TECMINE ha supuesto un cambio de paradigma en la estrategia de restauración de espacios altamente degradados (LIFE TECMINE, 2022).

Por ello, el desafío del proyecto era no solamente reducir sustancialmente la erosión, sino también reconstruir, a partir de una situación inicial desfavorable, las condiciones de un suelo capaz de albergar los diferentes procesos que se dan en un ecosistema adecuado (Turrión *et al.*, 2021).

Las actuaciones de restauración se implementaron en la mina Fortuna, situada en Ademuz, Valencia, abarcando un total de 14 hectáreas. La citada explotación era una antigua cantera de arenas silíceas, caolín y arcillas, cuyos materiales proceden mayoritariamente del Cretácico temprano, especialmente del Albiense.

La actividad extractiva de estos materiales constituye una industria significativa en la región, ya que representa más del 35% de la producción en la Comunitat Valenciana (LIFE TECMINE, 2022). Estos recursos minerales son de gran importancia no solo a nivel nacional, sino también en Europa, donde países como Italia, Alemania y Francia tienen una tradición minera extensa en la extracción de estos recursos.

Los diferentes enfoques utilizados en este proyecto han requerido de un equipo multidisciplinar formado por investigadores expertos y técnicos en el campo de la minería, restauración ecológica y gestión forestal, para llevar a cabo el diseño y la ejecución de las acciones. Así, el consorcio está compuesto cinco entidades que representan a los principales grupos de interés involucrados: la Generalitat Valenciana (GVA) como promotora y coordinadora del proyecto, la Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM) en la reconstrucción del suelo y la vegetación, la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) en la rehabilitación del terreno y las empresas SIBELCO MINERALES CERÁMICOS S.A. y Valenciana de Estrategias y Recursos para la Sostenibilidad Ambiental (VAERSA S.A.).

2. Objetivos

El objetivo principal de LIFE TECMINE ha sido conseguir la recuperación del ecosistema desde un enfoque holístico, explorando técnicas innovadoras y eficientes, alternativas a las empleadas hasta ahora para mejorar las restauraciones a cielo abierto en entornos forestales de ámbito mediterráneo.

Otros objetivos específicos han sido:

- Proponer soluciones técnicas que permitieran compatibilizar las actividades mineras con la conservación de los montes como productores de numerosos servicios ambientales.
- Proporcionar al sector minero y la Administración Pública, herramientas para diseñar y evaluar la idoneidad de las restauraciones.
- Mejorar la transferencia de conocimientos y la colaboración entre Administración, industria y ciencia.
- Ofrecer a la población local, nuevas oportunidades para disfrutar de las áreas restauradas.

3. Metodología

El proceso de restauración siguió varias fases (Figura 1). En primer lugar, el **diagnóstico del medio** permitió conocer las características de los ecosistemas del entorno, así como entender la dinámica y limitaciones existentes en la zona. Gracias a este conocimiento se estableció un ecosistema de referencia adecuado, que fue clave para el diseño de la restauración.

A continuación, se definieron los objetivos específicos de la restauración y se dividió la zona en unidades homogéneas (atendiendo a características fisiográficas) a las que se les aplicó un mismo tratamiento. Por último, se estableció un plan de monitoreo basado en el seguimiento de una serie de indicadores, aún vigente, que ha servido para asegurar una correcta ejecución de las acciones implementadas, la corrección de algunas desviaciones no previstas y la evaluación del éxito de la restauración.



Figura 1. Estructura y desarrollo del proyecto LIFE Tecmine (Fuente: Guía Metodológica para la Elaboración de Planes y Proyectos de Restauración de Espacios Forestales afectados por actividades mineras, URIOL et al. (2021)).

Las técnicas implementadas se englobaron en tres grupos: restitución del terreno, reconstrucción del suelo y establecimiento de la vegetación (Figura 2).

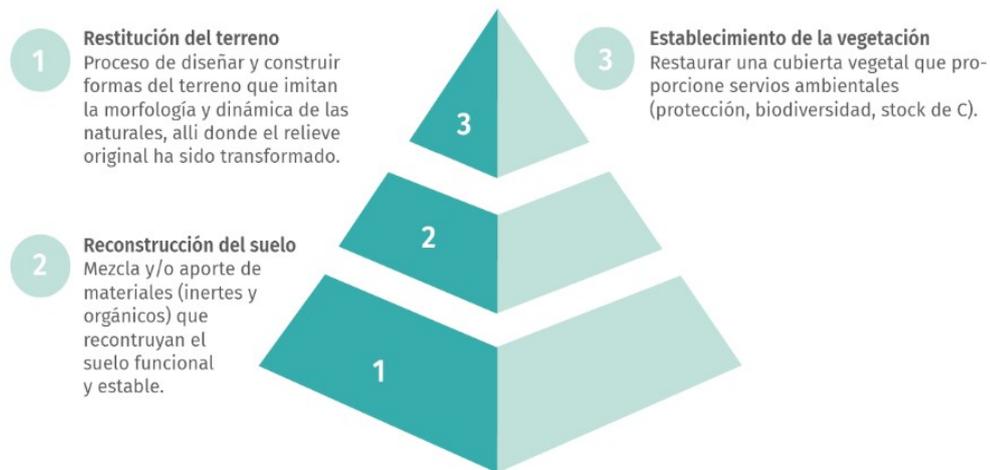


Figura 2. Esquema de intervenciones fundamentales del proceso de restauración minera en el ámbito forestal (Fuente: Guía Metodológica para la Elaboración de Planes y Proyectos de Restauración de Espacios Forestales afectados por actividades mineras, URIOL et al. (2021)).

1. Restauración geomorfológica

Uno de los aspectos más novedosos de este proyecto ha sido la rehabilitación de la geomorfología mediante el método GeoFluv-Natural Regrade™, como una alternativa a la metodología convencional de berma-talud en la restauración topográfica de espacios mineros.

GeoFluv-Natural Regrade es un procedimiento de rehabilitación capaz de reproducir la complejidad de las formas naturales del terreno y de las redes de drenaje de las cuencas hidrográficas. Permite diseñar formas del terreno y paisaje maduros estables, como los que se formarían naturalmente por procesos erosivos para los materiales, el clima y las condiciones fisiográficas del lugar.

El objetivo de esta metodología para el proyecto LIFE Tecmine ha sido proporcionar estabilidad a largo plazo partiendo de una situación muy adversa que consistía en la existencia de terrazas convencionales construidas a partir de los vertederos de estériles inestables y con importantes cárcavas (Martín *et al.*, 2019). Era esencial recrear las condiciones de un suelo capaz de albergar los diferentes procesos que se dan en un ecosistema totalmente recuperado.

Las condiciones ambientales que han favorecido esta inestabilidad geomórfica han sido una combinación de:

- Residuos mineros altamente erosionables, como son la arena y la arcilla.
- Terreno escarpado con pendientes elevadas y de gran longitud.
- Fuertes tormentas de verano típicas de los ambientes mediterráneos.
- Suelos delgados con poca cobertura vegetal y escaso contenido de materia orgánica.



Esta metodología se aplicó en dos áreas diferentes de la zona restaurada; la zona oeste (en adelante GeoFluv oeste) y zona este (en adelante GeoFluv este), con 5,91 y 1,80 hectáreas respectivamente. La implantación de GeoFluv se realizó en las siguientes fases:

- Localización de formas naturales estables en condiciones fisiográficas similares a las que se pretenden rehabilitar.
- Análisis de las condiciones topográficas e hidrológicas de partida de las zonas a rehabilitar.
- Diseño de una cuenca funcional en el área de rehabilitación mediante interacciones con el programa.
- Construcción de los modelados diseñados.

Posteriormente se realizó la monitorización del comportamiento hidrológico y erosivo-sedimentario del remodelado geomorfológico. Para estudiar la evolución geomorfológica de la zona restaurada se dividió la superficie en unidades homogéneas, en las que se midieron la formación y desarrollo de regueros y cárcavas y la incisión de los arroyo y cauces (Tabla 1).

Tabla 1. Indicadores de seguimiento de la restauración geomorfológica

Indicador	Método
Densidad de regueros (m/m ²)	Número y longitud de regueros
Volumen de regueros (m ³ /m ²)	A= ancho superficie *profundidad V sección= ((A+A1)/2)*L V sección= Pérdida de volumen de suelo entre dos secciones; A = Área sección; L= Longitud entre secciones
Tasa de erosión regueros (kg/ha)	Estimación directa comparando los DEM (Digital Elevation Model) de diferentes años

2. Reconstrucción del suelo

La fertilidad del suelo se identificó como un factor debido a la falta de almacenamiento de una capa superior del suelo con un contenido de nutrientes suficiente para sostener el crecimiento de las plantas. Las enmiendas orgánicas pueden compensar estos inconvenientes físico-químicos mejorando el desarrollo de la vegetación y estimulando la actividad microbiana.

Posteriormente a la remodelación del terreno se realizó la reconstrucción del suelo. Para ello, en algunas zonas en concreto se esparció coluvión calcáreo obtenido del movimiento de tierras durante la realización de los GeoFluv, y lodos de depuradora compostados mezclados con restos de poda en la superficie del sustrato, a razón de 20 toneladas por hectárea.

Además, se realizó el aporte de 2 kg de materia orgánica por cada hoyo de plantación.

3. Establecimiento de la vegetación

Una vez realizada la remodelación del terreno y la reconstrucción del suelo se llevó a cabo la revegetación, para lo cual se identificaron las diferentes unidades funcionales de paisaje (Turrión *et al.*, 2021) en función de características como la pendiente, exposición, tipo de suelo, etc. (Tabla 2).

Tabla 2. Unidades de restauración

Zona	Unidad de restauración	Características
Plataforma minera	RU1 (2,79 ha)	Zonas más secas (exposición sol) pendientes escarpadas (>30%)
RU2 (1,98 ha)	Pendientes moderadas (15-30%), orientación norte	
RU3 (0,46 ha)	Fondo de valle, zonas más húmedas	

Una vez identificadas estas unidades de restauración se siguieron los siguientes pasos:

1. **Selección de especies y producción de la planta:** se tuvieron en cuenta los ecosistemas de referencia presentes, experiencias previas de reforestación en ambientes mediterráneos, especies presentes en zonas protegidas cercanas como el Parque Natural de la Puebla de San Miguel (Valencia) y los hábitats presentes de la Red Natura 2000. En cuanto a la producción de la planta, se recogieron semillas de la zona y se les aplicaron y técnicas de cultivo en vivero adaptadas a las características funcionales de las especies mediterráneas. Posteriormente se trasladó la planta a un vivero cercano a mina para que se aclimataran a la zona.
2. **Estabilización del sustrato:** se realizó una siembra de especies nativas herbáceas para promover una rápida cobertura vegetal con la consecuente mejora de las propiedades físicas del suelo; instalación de bandas de astillado con materiales procedentes de trabajos selvícolas para aumentar la rugosidad del terreno y crear microambientes para refugio de la fauna.
3. **Técnicas de restauración:** en la plantación se combinaron diferentes técnicas en función de las características de cada unidad como la mejora de la captación del agua con micro-cuencas (Morcillo *et al.*, 2023), fertilizantes procedentes del compostaje de lodos de depuradora en los hoyos de plantación, tubos, mallas protectoras e hidrogeles.

El seguimiento de cobertura vegetal y biodiversidad se realizó en un total de 12 parcelas de muestreo de 100 m² cada una, distribuidas por las principales áreas restauradas. La supervivencia y crecimiento se midió en un total de 1.447 plantas (Tabla 3) en las diferentes unidades de restauración.

Tabla 3. Indicadores para la supervivencia y crecimiento

Indicador	Metodología	
VARIABLES CLIMÁTICAS	Estación meteorológica en zona restaurada con sensor humedad, piranómetro, barómetro y sonda humedad y temperatura para suelo	
Humedad suelo	Sonda TDR	
Caracterización inicial plántulas	Altura, diámetro, biomasa aérea y subterránea	Relación raíz/tallo
Supervivencia y crecimiento	Mortalidad	Crecimiento: altura, diámetro basal tallo

4. Resultados

El estudio realizado por la UCM y UNIZAR tras aplicar la Restauración Geomorfológica basada en el método GeoFluvTM muestra tasas de erosión inferiores a los modelos más convencionales y compatibles con un correcto desarrollo de la vegetación.

Junto a este modelo morfológico, la selección de un sustrato edáfico adecuado y una buena selección de especies es clave para alcanzar estas tasas y garantizar un correcto desarrollo del ecosistema restaurado a corto y largo plazo.

El seguimiento realizado por el CEAM arroja resultados de supervivencia que pueden considerarse positivos, con tasas de supervivencia elevadas (66% de media tras 4,5 años), comparado con resultados encontrados en la literatura y experiencias previas.

Los resultados relativos al crecimiento en altura y diámetro basal también muestran un adecuado establecimiento y desarrollo de las especies introducidas. Destacan los resultados de las especies de crecimiento lento que han respondido muy positivamente a las técnicas de preparación del terreno y mejoradores del suelo como las enmiendas orgánicas y las microcuencas.

4. 1 Geomorfología

En la Figura 3 se muestra el diseño y la evolución de la mina Fortuna (Ademuz, Valencia) rehabilitada.

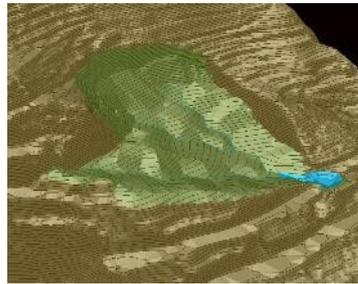
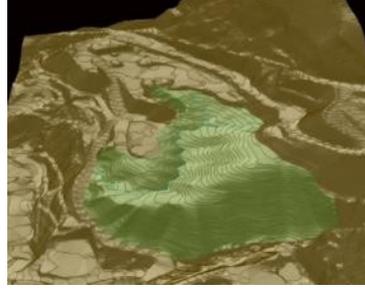




Figura 3. Mina Fortuna en Ademuz (Valencia). Arriba Geofluj oeste y abajo Geofluj este. De izquierda a derecha: vista aérea previa a la rehabilitación (julio de 2018); vista 3D del diseño; resultado tras remodelado geomorfológico, restitución del terreno, siembra y plantación (junio 2021).

De los diferentes modelos planteados se optó por el diseño que generaba pendientes menos elevadas y menor cantidad de movimiento de tierras. Una vez elegido el modelo, se llevó a cabo un proceso de formación del personal de oficina y campo para ejecutar el remodelado del terreno.

En el GeoFluv este se excavó 17.358 m³ y se rellenó 5.691 m³. La diferencia de volúmenes (11.667 m³) es el coluvión calcáreo que fue llevado a la zona oeste para ser esparcido por la superficie y funcionar como una mejora de la fertilidad del suelo. En el GeoFluv oeste, un total de 132.733 m³ de tierra fueron excavados y 32.476 m³ fueron trasladados a zonas de relleno.

Densidad de regueros

Durante el seguimiento en la formación de regueros se apreció que la zona restaurada correspondiente con el GeoFluv este no había desarrollado redes de surcos, lo cual siguió siendo así en el año 2023.

Dentro del GeoFluv oeste se parecían diferentes zonas:

- **Zonas de pendientes suaves y aporte de coluvión:** se han desarrollado redes de surcos de baja densidad (0,16 m/m²). En la actualidad los regueros han dejado de ser funcionales a medida que la vegetación se ha ido desarrollando. Actualmente no se han formado nuevos regueros.
- **Zona de pendientes pronunciadas:** es la zona más crítica, ya que por un lado la erosión aguas arriba en el cauce principal afectaba al 77,4% de la longitud del cauce en 2021, y, por otro lado, la densidad de la red de regueros es cercana a los índices máximos tolerables para que pueda desarrollarse la comunidad vegetal (0,60-0,70m/m²; MORENO DE LAS HERAS et al. 2009; 2011).
- **Zonas no cubiertas por coluvión:** esta zona evolucionó de 0,24 a 0,32 m/m² entre 2020 y 2021. Las observaciones realizadas en diciembre de 2023 indican una estabilización de las formas erosivas. El escaso desarrollo de la vegetación se debe a la mala calidad del suelo.



Figura 4. Seguimiento en diciembre de 2023 (Ademuz, Valencia). Arriba-izq.: Vista panorámica del Geofluv este. Arriba-dcha.: Geofluv oeste. Zona de pendientes suaves. Abajo-izq.: Geofluv oeste. Zona de pendiente pronunciadas. Abajo-dcha.: Geofluv oeste. Zonas no cubiertas por coluvión. Fuente: Informe de Seguimiento 2023, Nicolau et al.

Volumen regueros y tasa de erosión

En cuanto al volumen de regueros y la tasa de erosión, los resultados son similares. La zona más abrupta del GeoFluv presenta las mayores tasas de erosión en cárcavas. Son especialmente elevados en las concavidades (volumen regueros 0,04 m³/m², tasa erosión 275 T/ha/año) y zonas expuestas al sol (volumen regueros 0,03 m³/m², tasa erosión 170 T/ha/año).

En la cuantificación de la erosión ascendente en los 4 canales medidos, los resultados muestran que los cauces ubicados en las zonas más abruptas del GeoFluv dan valores más altos de erosión.

4.2 Establecimiento de la vegetación

Variables climáticas



El análisis de los parámetros climáticos registrados en la estación meteorológica instalada mostró una variación intra e interanual típica del clima mediterráneo para el periodo de seguimiento.

Humedad del suelo

El análisis de la humedad del suelo registrada por las sondas TDR en los hoyos de plantación mostró una elevada variabilidad anual, que osciló entre los valores máximos 0,5 m³.m⁻³ en otoño-invierno de 2019 y menos de 0,1 m³.m⁻³ durante los meses de verano.

En general, no se encontraron grandes diferencias entre Unidades de Restauración. RU1 mostró los valores más bajos y RU2 los más altos. Esto puede ser debido a la combinación de pendientes poco profundas, así como al efecto de la microcuenca implementada que capturaba el agua de escorrentía del suelo redirigiéndola hacia el hoyo de plantación. En el caso de RU1, el suelo poco estructurado y las elevadas pendientes generaron una escorrentía superficial que dio lugar a mayores pérdidas de agua.

Caracterización inicial de las plántulas

Considerando el tamaño de las especies introducidas en el área restaurada antes de la plantación, la mayoría de las plántulas se encontraban dentro de los rangos de calidad cabal y comercial para la especie.

Supervivencia y crecimiento

La tasa media de supervivencia en julio de 2023 (4,5 años después de la plantación) fue del 70%, 68% y 51% para las unidades restauración RU1, RU2 y RU3 respectivamente.

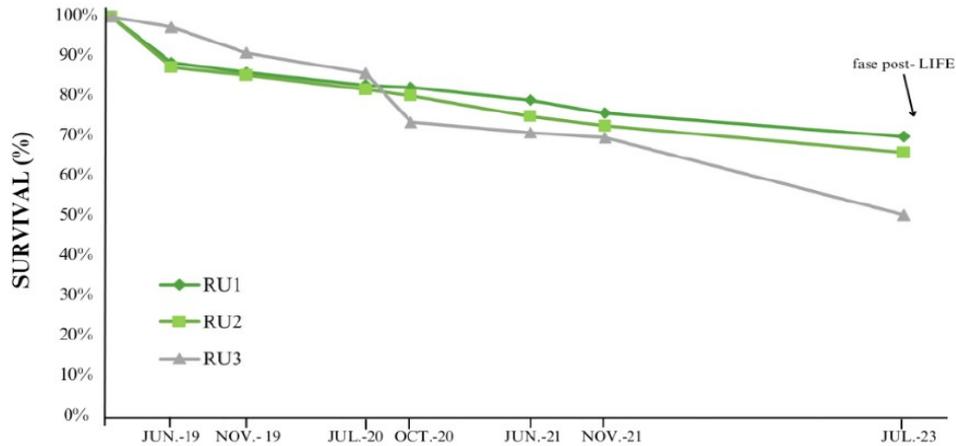


Figura 5. Dinámica de supervivencia. Fuente: Informe de Seguimiento 2023, Vilagrosa et al.

Las especies con mejores resultados de supervivencia fueron *Brachypodium phoenicoides*, *Dorycnium pentaphyllum*, *Juniperus phoenicea* y *Salvia rosmarinus*, con tasas de supervivencia superiores al 85%.

El crecimiento de las plántulas fue variable en función de la especie y de la unidad de restauración. En general, todas las especies mostraron tasas de crecimiento positivas, sin embargo, algunas de ellas se vieron especialmente afectadas por la depredación (por corzos o jabalíes) mostrando valores ligeramente inferiores a muestreos anteriores.

Colonización natural, biodiversidad y protección del suelo

La cubierta vegetal se situó en torno al 66%. En RU2 había aumentado, mientras que en RU1 Y RU3 disminuyó ligeramente. Estas tendencias decrecientes se deben posiblemente a la alta exposición solar para RU1 y a la ampliación de una cárcava en RU3.

En relación con las especies sembradas para la protección del suelo la cobertura vegetal absoluta cambió significativamente con el tiempo, dependiendo de la especie. En el seguimiento de 2023 se comprobó que la cobertura disminuyó considerablemente en todas las unidades lo que puede haber favorecido la colonización natural de especies autóctonas

En cuanto a la diversidad vegetal, se encontraron 20, 33 y 27 especies no introducidas en las unidades de restauración RU1, RU2 y RU3 respectivamente, lo cual es un signo positivo ya que el objetivo era mejorar las condiciones ecológicas para facilitar el reclutamiento de nuevas plantas autóctonas.

54. Discusión Conclusiones

Uno de los hallazgos más relevantes de este estudio es la menor tasa de erosión



observada en la restauración geomorfológica basada en el método GeoFluvTM en comparación con modelos convencionales. Este resultado indica que el diseño de la topografía restaurada y la selección de sustratos adecuados desempeñan un papel clave en la estabilización del terreno y el control de la erosión. Estos hallazgos coinciden con estudios previos que destacan la importancia de la geomorfología restaurada para reducir la erosividad del suelo y facilitar la revegetación (Moreno de las Heras *et al.*, 2009; 2011). En base a estos resultados, se plantea la hipótesis de que la estabilización observada en la evolución de las formas erosivas en la mayor parte de la zona restaurada continuará en el tiempo, lo que permitirá un desarrollo vegetal progresivo y sostenible.

Otro resultado relevante es la mejora en las propiedades del suelo gracias al aporte de coluviones calcáreos y lodos de depuradora compostados, el cual ha mostrado ser crucial para el aumento de la fertilidad del suelo y la mejora en las tasas de supervivencia de las especies vegetales. Con un promedio de supervivencia de 66% a los 4,5 años, los resultados superan los observados en proyectos similares en la región, donde las tasas de supervivencia suelen ser mucho más bajas debido a la escasez de nutrientes y la alta erosión. Factores como la selección de especies autóctonas, el uso de semillas de origen local y la aplicación de enmiendas orgánicas han contribuido a este éxito. La literatura señala que la restauración de ecosistemas degradados en climas mediterráneos es más efectiva cuando se utilizan especies adaptadas a las condiciones ambientales locales y cuando se mejora la calidad del suelo mediante el aporte de materia orgánica (Fuentes *et al.*, 2010), favoreciendo tanto el crecimiento de la vegetación como la mejora en la calidad del suelo a largo plazo

Por lo que respecta a la formación de regueros, se observó que las zonas con pendientes pronunciadas presentaban densidades de regueros cercanas a los valores límite tolerables para el desarrollo vegetal (0,60-0,70 m/m²), mientras que las zonas con pendientes suaves y aporte de coluviones mostraban redes de surcos de baja densidad (0,16 m/m²). Estos datos son congruentes con Feng *et al.* (2019) que estudiaron cómo la adición de materiales calcáreos en la rehabilitación de tierras afectadas por minería puede mejorar la estructura del suelo y disminuir la erosión. Además, la investigación de Martín-Duque *et al.* (2010) indica que los suelos mejorados con coluvión calcáreo pueden favorecer la vegetación al aumentar la disponibilidad de nutrientes y la retención de agua. Como consecuencia, se podría plantear la necesidad de estrategias adicionales de control en zonas con mayores pendientes, como la aplicación de barreras naturales o la introducción de especies con sistemas radiculares más eficientes en la fijación del suelo.

Cabe destacar la evolución de la humedad del suelo. La variabilidad intra e interanual de la humedad fue considerable, pero la implementación de microcuencas permitió un incremento del 7% en la humedad del suelo en las unidades de restauración con esta técnica. Estos resultados concuerdan con investigaciones previas que evidencian el papel fundamental de las microcuencas en la captación de agua y la mejora de la disponibilidad hídrica para la vegetación en regiones mediterráneas (Morcillo *et al.*, 2023). Se sugiere que la expansión del



uso de microcuencas podría mejorar la eficiencia hídrica de la restauración en terrenos con escasa retención de agua.

Otro aspecto destacable es la colonización natural de especies vegetales autóctonas en las unidades de restauración, lo que indica una progresiva recuperación ecológica. Estudios previos han resaltado que la colonización natural es un indicador clave de la restauración exitosa de un ecosistema (SER, 2004). Una posible explicación de este fenómeno es la mejora en la estructura del suelo y la disponibilidad hídrica, lo que ha generado condiciones más favorables para la germinación y el establecimiento de especies nativas. Como consecuencia, podría esperarse que la biodiversidad en la zona restaurada continúe aumentando con el tiempo, acercándose progresivamente a los ecosistemas de referencia.

Finalmente, la biodiversidad y la colonización natural evidencian una mejora en la estabilidad ecológica del área restaurada. La presencia de hasta 33 especies vegetales no introducidas en RU2 indica que las condiciones ecológicas son favorables para el reclutamiento de nuevas especies. Estudios similares han reportado que la heterogeneidad del microhábitat y la calidad del suelo restaurado son factores clave para la regeneración natural (Vallejo *et al.*, 2012). En base a estos resultados, se podría considerar la incorporación de estrategias de facilitación ecológica, como el mantenimiento de estructuras muertas que favorezcan el reclutamiento de plántulas y la diversidad funcional del ecosistema.

En conclusión, los resultados obtenidos en el proyecto LIFE TECMINE confirman la eficacia de las técnicas implementadas para la restauración de minas en la región mediterránea. La reducción de la erosión, la mejora en la fertilidad del suelo y la alta supervivencia de la vegetación reflejan el éxito del enfoque holístico empleado. Sin embargo, la influencia de factores como la pendiente, el tipo de sustrato y el clima mediterráneo siguen siendo determinantes en la evolución del ecosistema restaurado, lo que subraya la importancia de continuar con el seguimiento y ajuste de las estrategias de restauración a largo plazo.

6. Conclusiones

Desde el punto de vista de la remodelación geomorfológica, puede concluirse que, aunque la evolución de las formas erosivas en el GeoFluvTM con mayores pendientes sigue activa, en el resto de la superficie hay una estabilización de su evolución en el tiempo y compatibilidad con el desarrollo de la vegetación.

En cuanto a la restitución del suelo, se ha comprobado que el aporte de lodos de depuradora y coluvión calcáreo en la superficie ha resultado clave en la mejora de las condiciones del suelo para la recuperación de la vegetación, favoreciendo altas tasas de supervivencia y el buen desarrollo de las plantas introducidas.



Se ha comprobado que la topografía y el tipo de sustrato son dos factores clave para controlar la erosión, pero la pendiente es el factor más significativo en la formación de regueros y el tipo de sustrato es el factor que más influye en la disponibilidad de agua en el suelo para las plantas.

Por lo que respecta a la recuperación de la cubierta vegetal, es importante una adecuada selección de especies, ya que promueve altas tasas de supervivencia independientemente de las condiciones abióticas, incluso en los escenarios más desfavorables, como el RU1. La procedencia local de las semillas y la aclimatación de las plántulas a las condiciones abióticas de la zona asegura una buena adaptación y desarrollo de las plantas introducidas. Disponer de un Banco de Semillas de variedades locales y certificadas, junto con técnicas de cultivo adecuadas, permite una elevada calidad de planta forestal.

El uso de técnicas de bajo coste que favorezcan la captación de agua, como las microcuencas, puede ser una buena opción para reducir costes de mantenimiento como los riegos y/o la reposición de marras. Los resultados muestran un aumento de la humedad del suelo de alrededor del 7%.

Alcanzar una elevada cobertura vegetal es esencial para detener los procesos de degradación del suelo y acelerar la restauración de procesos ecológicos clave. Tras 4,5 años, la cubierta vegetal mostraba valores medios superiores al 60%. Además, se aprecia una presencia significativa de biomasa muerta que se ha incorporado al suelo y, posteriormente, ha aumentado su fertilidad.

Para saber más: <https://mediambient.gva.es/es/web/life-tecmine/inicio>

7. Bibliografía

FENG, Y.; WANG, J.; BAI, Z.; READING, L. 2019. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review. *Earth-Science Reviews*, 191(November 2017), 12–25.

FUENTES, D; VALDECANTOS, A.; LLOVET, J.; CORTINA, J.; VALLEJO, R. 2010. Fine-tuning of sewage sludge application to promote the establishment of *Pinus halepensis* seedlings, *Ecological Engineering*, 36: 1213-1221.

INFORMES DE SEGUIMIENTO:
<https://mediambient.gva.es/es/web/life-tecmine/documents-proyecto> (2024).

LIFE TECMINE. (2022). *Informe final del proyecto LIFE TECMINE: Innovación en la restauración de minas en la región mediterránea*.
<https://mediambient.gva.es/es/web/life-tecmine>

MARTÍN-DUQUE, JF.; SANZ, MA.; BODOQUE, JM.; LUCÍA, A.; MARTÍN-MORENO, C. 2010. Restoring earth surface processes through landform design. A 13-year monitoring of a geomorphic reclamation model for quarries on slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(5), 531– 548.

MARTÍN, JF. *et al.*; 2019. Geomorphic rehabilitation in Europe: recognition as best available technology and its role in LIFE projects. *Mine Closure, Perth* 133-146.



MORCILLO, L.; TURRIÓN, D.; FUENTES, D.; VILAGROSA, A.; 2023. Drone-based assessment of microsite-scale hydrological processes promoted by restoration actions in early post-mining ecological restoration stages. *Journal of Environmental Management*, 348: 119468. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119468>.

MORENO-DE LAS HERAS, M.; MERINO L.; NICOLAU J.M.; 2009. Effect of vegetation cover on the hydrology of reclaimed mining soils under Mediterranean-Continental climate. *Catena*, 77: 39-47.

MORENO-DE LAS HERAS, M.; ESPIGARES T.; MERINO-MARTÍN L.; NICOLAU J.M.; 2011. Water-related ecological impacts of rill erosion processes in Mediterranean-dry reclaimed slopes. *Catena*, 84: 114-124.

SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION (SER) International, Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas. 2004. Principios de SER International sobre la restauración ecológica.

TURRIÓN, D.; MORCILLO, L.; ALLOZA, J.A.; VILAGROSA, A.; 2021. Innovative Techniques for Landscape Recovery after Clay Mining under Mediterranean Conditions. *Sustainability*: 13, 3439. <https://doi.org/10.3390/su13063439>.

URIOL J.; OLMO B.; ROSELL S. et al. 2021. Guía metodológica para la elaboración de Planes y Proyectos de Restauración de Espacios Forestales afectados por Actividades Mineras. Generalitat Valenciana, V-2942-2021. <https://mediambient.gva.es/es/web/life-tecmine/guies-techniques>.

VALLEJO, R.; ALLEN, E.; ARONSON, J.; PAUSAS, J.; CORTINA, J.; GUTIÉRREZ, J. 2012. Restoration of Mediterranean-type woodlands and shrublands. *Restoration Ecology: The New Frontier*. Second edition. 11: 130-144.

Informes de Seguimiento:
<https://mediambient.gva.es/es/web/life-tecmine/documents-projecte> (2024).