



Nombre del proyecto

RESTAURACIÓN ECOLÓGICA CON BASE GEOMORFOLÓGICA DE LA EXPLOTACIÓN SAN LUIS (GRUPO MINERO GUADAZAÓN) (SICA S. L.).

Localización/Ámbito de la actuación

El proyecto se ubica en el término municipal de Arquisuelas (Cuenca), al lado de la carretera CM-2123, en el punto kilométrico 9.

Entidad promotora de las actuaciones de restauración

SICA S. L.-Euroarce-Grupo SAMCA.

Entidad/es socia/s del proyecto

Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Geología, Universidad Complutense de Madrid.

Periodo en el que se ha desarrollado el proyecto

Abril de 2021-noviembre de 2021.

Origen de la perturbación/degradación del espacio

Grupo II. Industria extractiva (minería, dragados, perforaciones, etc.).

Ecosistemas afectados

La zona en la que se ubica el proyecto se caracteriza por poseer grandes masas forestales de pinar, entremezcladas con pequeñas parcelas agrícolas. En las masas boscosas aparecen, principalmente, dos especies, que son el *Pinus pinaster* y el *Pinus nigra* como masas mixtas que, en función de las condiciones de los sustratos, pueden ser de una sola especie.

Los hábitats de la directiva presentes en el área son el «Hábitat HIC 9530. Pinares (sud-) mediterráneos de pinos negros endémicos (*Pinus nigra* subsp. *Salzmannii*)».

Otros hábitats presentes en el área que pueden identificarse en los claros y zonas degradadas de las masas boscosas son el «HIC 4090. Brezales oromediterráneos endémicos» y el «HIC 6220. Zonas subestépicas de gramíneas y anuales del *The-ro-Brachypodietea*», que se corresponde con pastos xerófilos más o menos abiertos formados por diversas gramíneas y pequeñas plantas anuales, desarrollados sobre sustratos secos, ácidos o básicos, en suelos generalmente poco desarrollados.

A partir de los datos del inventario realizado acerca de la vegetación en el entorno del proyecto, y del análisis de las fotos aéreas previas al inicio de la explotación minera, se puede concluir que los terrenos afectados por la explotación minera se correspondían con algunas parcelas de cultivo y con una masa mixta de *Pinus pinaster* y *Pinus nigra* con un sotobosque no muy denso dominado por especies como el romero (*Rosmarinus officinalis*), el tomillo (*Thymus vulgaris*), la coscoja (*Quercus coccifera*) y el enebro (*Juniperus oxycedrus*).

Motivación para desarrollar el proyecto

Con la adquisición de los activos mineros de la empresa CAOLINA por SICA, en el año 2012, se asumieron las obligaciones legales respecto de la restauración de la explotación minera, la cual a esa fecha se encontraba ya agotada y pendiente de restaurar.

Al abordar la restauración del espacio minero degradado, se planteó no sólo cumplir con la estricta obligación legal, sino también contribuir al desarrollo de nuevas soluciones de restauración para este contexto fisiográfico que pudieran ser aplicables, más adelante, en otros frentes o explotaciones similares.

En este caso, es de destacar que la actuación se ha planteado como una solución que no se queda en un mero proyecto demostrativo o piloto, y por tanto como una actuación puntual. Las soluciones implementadas y las experiencias adquiridas en la concesión de explotación San Luis han sido transferidas, de modo casi inmediato, a las explotaciones activas cercanas como la explotación Frente 1-M.^º Pilar VII. Siendo, por ello, el segundo ejemplo nacional y europeo de una explotación en activo en la que se aplican las técnicas de restauración minera progresiva con base geomorfológica.

Diagnóstico ecológico

El estado previo a la restauración realizada de la explotación San Luis, que ocupa una superficie de 14 ha, era el de un hueco minero degradado con materiales arenos-arcillosos directamente expuestos, tanto del sustrato como de escombreras, sujetos a intensos procesos activos erosivos de erosión laminar en surcos y en cárcavas.

El estado de la explotación San Luis no permitía una recuperación espontánea de la cubierta edáfica y vegetal. El motivo es que, si bien a la zona podían llegar propágulos (semillas) de la vegetación del entorno, la intensa erosión hídrica ocasiona un transporte y evacuación de las mismas, y de posibles nutrientes, bien hacia los huecos endorreicos, bien hacia el exterior. En definitiva, los procesos de edafogénesis y colonización vegetal estaban bloqueados. Asimismo, la actividad extractiva había modificado la red hidrográfica y el drenaje de la mayoría de esta superficie se realizaba hacia tres huecos endorreicos, si bien el ubicado más al este conectaba por rebose, a través de un pequeño tributario, con el Arroyo del Prado de la Olmeda.

El entorno es un extenso territorio formado por las gargantas del río Cabriel y sus afluentes. Todo el recorrido se caracteriza por los sustratos calizos en los que se originan cortados que permiten la nidificación de las aves rupícolas, resultando una de las zonas más importantes de la provincia de Cuenca para la conservación de especies como el águila azor-perdicera (*Aquila fasciata*), el águila real (*Aquila chrysaetos*), el halcón peregrino (*Falco peregrinus*), el búho real (*Bubo bubo*) y el águila culebrera europea (*Circaetus gallicus*). También son importantes las comunidades de mamíferos, peces, anfibios y reptiles.

Objetivos de la restauración y ecosistema de referencia

El objetivo inicial planteado con la rehabilitación del espacio minero degradado era establecer las bases para la recuperación de los ecosistemas de referencia y conseguir la integración paisajística de la explotación.

Los ecosistemas de referencia son dos. En primer lugar, el bosque de *Pinus nigra* existente en el entorno y que se corresponde además con el estado previo de los terrenos. Adicionalmente, la explotación había generado unas lagunas endorreicas y se planteó mantener estas como punto de atracción de fauna mejorando el acceso a ellas y planteando medidas adicionales para el fomento de la biodiversidad.

Marco legal

La legislación básica que sirve de marco para el desarrollo del proyecto es la siguiente:

- Ley 22/1973, de 21 de julio de 1973, de Minas.
- Real Decreto 975/2009, de 12 de junio de 2009, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras.
- Real Decreto 2857/1978, de 25 de agosto, del Reglamento General para el Régimen de la Minería.
- Decreto 485/1962, de 22 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento de Montes.
- Ley 3/2008, de 12 de junio, de Montes y Gestión Forestal Sostenible de Castilla-La Mancha.

Acciones de restauración

Las actuaciones de restauración se centraron en:

- Diseñar unas topografías hidrológicamente funcionales, con redes de drenaje que se integren y complementen con las del entorno, y con los huecos endorreicos existentes.
- Establecer, sobre estas nuevas topografías, propuestas para la recuperación de los procesos edafogenéticos y de una cubierta vegetal adecuada a este entorno.

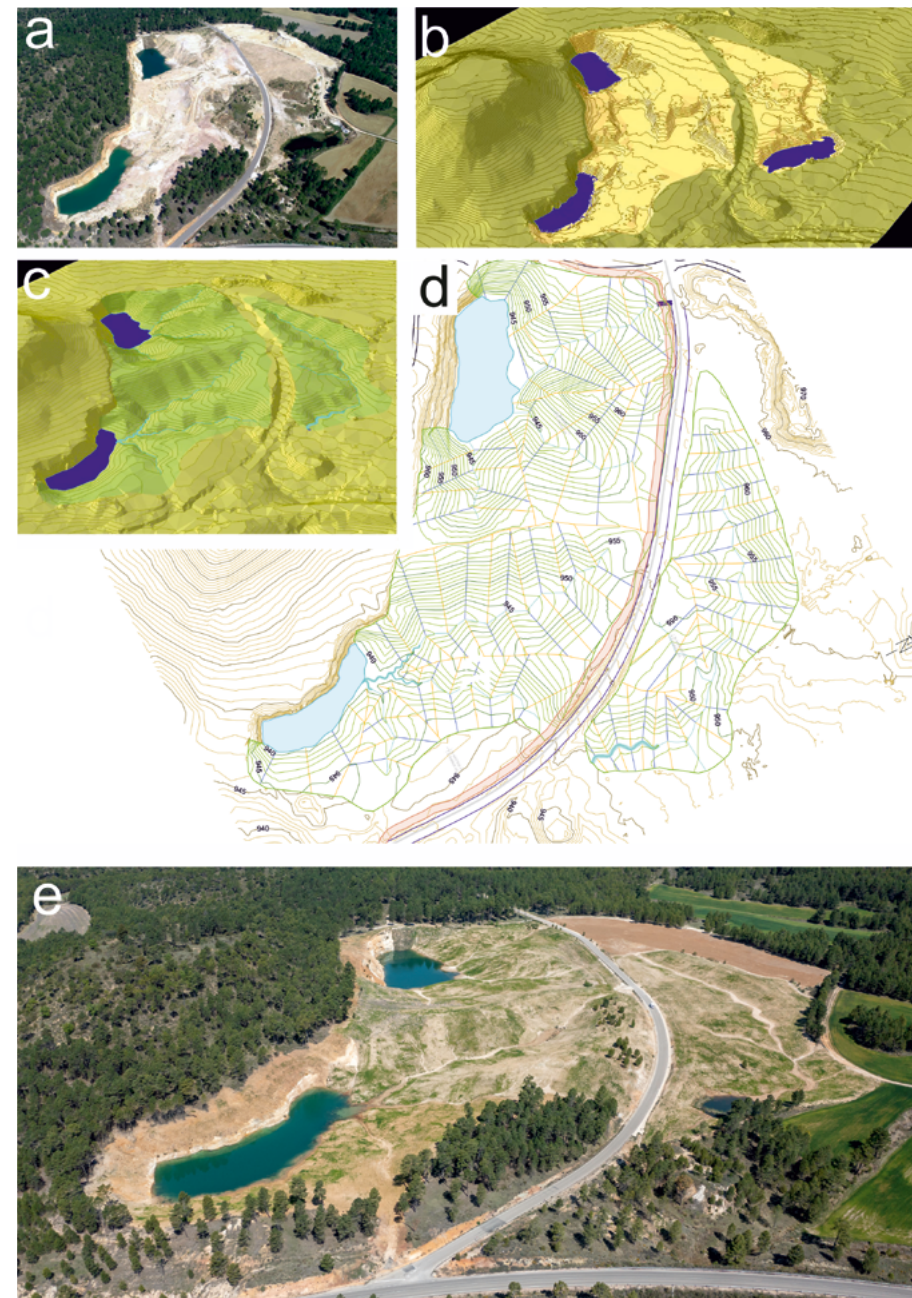
En los **aspectos geomorfológico e hidrológico**, se ha cuidado en extremo el enlace entre las superficies restauradas y los relieves de los terrenos no modificados por la actividad extractiva, de modo que la fusión y transición entre ambas es magnífica. Pero también este proyecto de restauración es pionero, a nivel nacional, en la combinación de medidas de estabilización de drenajes «naturales» (que replican las redes fluviales naturales) con armados de roca caliza (en dos de los canales) y con manta orgánica (en uno de los canales, por el que circulará el mayor caudal en las venidas de agua).

En el **aspecto edáfico**, ante la ausencia de sustratos con capacidad edáfica adecuada, la principal innovación ha sido la «fabricación» de un sustrato que aúna propiedades físicas y químicas características de formaciones superficiales de tipo «coluvión», y de los suelos desarrollados sobre las mismas. Así, se ha procedido a realizar una mezcla de gravas de roca caliza, materiales de textura limosa (estériles mineros con cierta capacidad edáfica) y estiércol de oveja de la zona.

En las zonas de mayor pendiente se ha procedido al extendido de restos orgánicos de tala y poda en el monte cercano. Esta práctica, que es muy común en Australia, es aún totalmente novedosa en España.

En cuanto a **la vegetación**, se han realizado la siembra de herbáceas y gramíneas y la plantación de arbustivas y arbóreas de especies autóctonas de la zona, principalmente en cuanto a las arbóreas, *Pinus nigra*.

En el ámbito de **la fauna**, entre otras medidas, queremos destacar que se han instalado «perchas» o «posaderos» de aves, con el fin de favorecer la dispersión de semillas por zoocoria, así como tocones de madera y restos de troncos para favorecer la presencia de insectos xilófagos que sirven de alimento para diferentes especies de aves.



➤ **Figura 1.** Situación inicial (a y b), proyecto (c y d) y situación final (e). **Autoría:** SICA S. L.-Euroarce-Grupo SAMCA.

Resumen

- **Remodelado del terreno:** reconstrucción topográfica y de la red de drenaje.
- **Instalación de refuerzos en canales** con la colocación de armados de roca caliza (dos canales) e instalación de manta orgánica (un canal).
- **Reconstrucción de un sustrato edáfico:** al tratarse de una zona ya explotada, y no existir un acopio utilizable de los suelos originales, fue necesario adquirir enmienda orgánica (estiércol) y *mulch* de rocas calizas (aportando este pedregosidad superficial).
- **Extendido de restos vegetales** provenientes de talas y podas del monte en los taludes de mayor pendiente, minimizando erosión por escorrentía, aumentando la infiltración y aportando una cantidad importante de semillas que acompañan a los restos. Parte de estos restos fueron triturados para comparar cómo actúan en función del tamaño.
- **Siembra y plantación** de las especies autóctonas de la zona, principalmente en cuanto a las arbóreas, *Pinus nigra*.
- **Instalación de perchas o poleiros** para avifauna dispersadora de semillas (proceso de zoocoria).

Acciones para la participación de los grupos de interés y salvaguarda de sus intereses

Se han desarrollado diferentes jornadas en las que han participado especialistas en diferentes ramas de la rehabilitación de terrenos y estudiantes.

- I Jornada de campo de la Red de Restauraciones Mineras, grupo de reciente creación (30 asistentes).
- Jornada explicativa del proyecto a personal de explotaciones suecas donde se está valorando implantar estas geomorfologías (12 asistentes).
- Visita de estudiantes de 2.º de Bachillerato del Instituto Los Olmos (Albacete) (25 asistentes).
- Visita de estudiantes del Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas de la Universidad Politécnica de Madrid (primera semana de junio de 2022) (20 asistentes).

Seguimiento de la RE

Los principales indicadores para el seguimiento son los siguientes:

- Revisión del estado general de los taludes.
- Control de la aparición de procesos erosivos tanto en los taludes como en los canales.
- Seguimiento de las diferentes medidas de estabilización implementadas en los canales con el objeto de determinar cuál de ellas es la más adecuada, armados de roca caliza frente a protección con manta orgánica.
- Seguimiento de la revegetación: grado de cobertura, desarrollo vegetativo y marras.

El estudio de la evolución de los relieves construidos, tanto de la morfología general como de los canales, se está realizando con fotografías aéreas y levantamientos topográficos mediante técnicas de fotogrametría con dron.

En el caso de la vegetación, se está realizando el seguimiento mensual de campo y semestral de imágenes con dron de la cobertura vegetal, así como de la composición de especies. Respecto de la plantación, se está realizando el seguimiento de supervivencia y crecimiento de los plantones.

Mantenimiento

El área restaurada se encuentra cercana a las actuales explotaciones de las que la empresa SICA es titular en la zona, por lo que, de ser necesarios trabajos de mantenimiento, estos se realizarán con los medios de que SICA dispone en la zona, si bien los trabajos ejecutados con maquinaria finalizaron hace más de doce meses y no ha sido necesario realizar mantenimiento alguno al respecto. Actualmente, se está realizando el seguimiento de la evolución de la vegetación y, en este caso, se ha ejecutado algún trabajo posterior, como ha sido un abonado en la primavera de 2022 para favorecer la revegetación.

Desviaciones

A partir del seguimiento realizado se observa que, pasado el primer año desde la siembra, el grado de cobertura vegetal no es homogéneo en todos los taludes y que el desarrollo de las plantas del estrato herbáceo es menor del esperado, con la excepción de las zonas que se cubrieron con restos vegetales. El hecho parece que podría estar motivado porque el «suelo» reconstituido no ha resultado ser el óptimo para el desarrollo de la vegetación por dos razones.

En primer lugar, por la heterogeneidad final de los suelos que presentan zonas de consistencia muy arenosa que forma una costra superficial dura y que, en ausencia de lluvias, dificulta la germinación. Asimismo, las precipitaciones durante el último año en la zona han sido inferiores a las normales.

En segundo lugar, por una baja proporción de materia orgánica. Aunque se empleó estiércol curado de oveja para enriquecer el suelo, posiblemente la dosis empleada debería haber sido mayor. En el otoño de 2022 se ha procedido a aplicar un abonado con el fin de fomentar un mejor desarrollo de la vegetación.



➤ **Figura II.** Vista aérea del estado previo. Realizada en julio de 2020. **Autoría:** SICA S. L.-Euroarce-Grupo SAMCA.



➤ **Figura III.** Vista aérea de la restauración ejecutada. Realizada en mayo de 2022. **Autoría:** SICA S. L.-Euroarce-Grupo SAMCA.

Evaluación final

El proyecto se ha ejecutado en su totalidad según el nuevo plan de restauración que se presentó a la Administración, y esta ha realizado ya la inspección a través de los técnicos de medio ambiente de Cuenca, para dar el visto bueno a los trabajos ejecutados.

El objetivo de integración paisajística del espacio minero degradado se ha conseguido plenamente, tal como se puede apreciar en las fotografías que se incluyen. Si bien es todavía prematuro valorar la consecución del objetivo de desarrollar un ecosistema funcional integrado en el entorno natural, se espera una evolución positiva en los próximos años.

Se ha constatado el excelente resultado de la revegetación en las áreas en las que se han extendido restos vegetales, aun siendo estas las de taludes de mayor pendiente.

Aunque localmente se han producido pequeños regueros en algunos taludes, estos corresponden a los ajustes normales esperables en los primeros años. Por otra parte, los canales principales diseñados han funcionado adecuadamente y apenas han sufrido procesos erosivos, quedando estos restringidos a un pequeño tramo al final en respuesta a los cambios del nivel de agua en la laguna provocados por el estiaje.

Los arrastres de finos en los canales han contribuido a la creación de pequeños deltas en las lagunas sobre los que se está desarrollando un carrizal, lo que favorece el proceso de naturalización. Se ha observado la presencia de anfibios y la utilización de las lagunas por aves ligadas a estos medios. Asimismo, se observa que el espacio es utilizado habitualmente por mamíferos ungulados ligados al medio forestal que también han podido contribuir a limitar el desarrollo de la vegetación en algunas zonas y provocar algunas marras en la plantación de arbóreas y arbustivas.

Persistencia de la zona restaurada

Las zonas restauradas se ubican en terrenos de monte de utilidad pública con gestión municipal y terrenos municipales agrícolas. Son colindantes con una zona LIC y ZEPA Hoces del Cabriel, Guadazaón y Ojos de Moya (código LIC ES4230013 y código ZEPA ES0000159).

Por lo tanto, existe un alto grado de certidumbre y garantía en la conservación de las zonas restauradas. Con ello, se garantiza una custodia de los terrenos por la Administración Regional de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.

Presupuesto y financiación

Presupuesto de 250.000 €, financiación propia.

Sistemas de control

No se han implementado sistemas de control conforme a estándares de sistemas de certificación.

Cualificación del personal

Diseño

José Francisco Martín Duque, doctor en Geología, máster en Evaluación y Corrección de Impactos Ambientales, profesor titular del Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Geología, Universidad Complutense de Madrid, experto en restauración geomorfológica en minería.

María Tejedor Palomino, licenciada en Geología, experta en restauración geomorfológica, Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Geología, Universidad Complutense de Madrid.

Ejecución

Javier Álvarez González, ingeniero de minas, especialidad de laboreo y máster en prevención de riesgos laborales. Director facultativo en Grupo SAMCA.

Luis Miguel Trigueros Ramos, geólogo y eurogeólogo. Responsable de producción de SICA S. L.

Oscar Gutiérrez Estrada, responsable de Tayser en las explotaciones de SICA S. L.

José Alfonso Marín Gardón, operador de *bulldozer* de Tayser.

José Luis Cano Escribano, operador de retroexcavadora de Tayser.

Revegetación

Julián Valdivia Garrido, experto en restauraciones paisajísticas y ambientales. Gerente de Reforestaciones y Viveros S. L.

Marta Hidalgo Lancho, ingeniera agrícola. Experta en desarrollo agrario y ambiental. Técnico de Reforestaciones y Viveros S. L.

Más información

Autor: Javier Álvarez González (Grupo SAMCA).



Nombre del proyecto

LIFE RIBERMINE (ESCENARIO DE PEÑALÉN, GUADALAJARA)

Localización/Ámbito de actuación

Municipio de Peñalén (Guadalajara, Castilla-La Mancha).

Entidad promotora de las actuaciones de restauración

Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.

Entidad/es socia/s del proyecto

Socio coordinador: Dirección General de Transición Energética. Gobierno de Castilla-La Mancha. Socios asociados: Universidad Complutense de Madrid, Asociación Centro Ciencia Viva de Lousal (Portugal), CAOBAR S.A. y GEACAM.

Periodo en el que se ha desarrollado el proyecto

Octubre de 2019-marzo de 2024.

Origen de la perturbación/degradación del espacio

Grupo II. Industria extractiva (minería, dragados, perforaciones, etc.).

Ecosistemas afectados

Pinares (sud-) mediterráneos de *Pinus nigra* endémicos (9530*) y robledales ibéricos de *Quercus faginea* y *Quercus canariensis* (9240).

Motivación para desarrollar el proyecto

Eliminación del impacto ambiental crítico (hidrológico aguas abajo, ecológico y paisajístico *in situ*) originado por las minas abandonadas de caolín de Peñalén. Desarrollo de mejores técnicas disponibles en restauración minera que puedan ser transferidas al sector minero y a las administraciones públicas.

Diagnóstico ecológico

La mina Santa Engracia se ubica en la zona periférica de protección del parque natural del Alto Tajo, en el sistema Ibérico, en un espacio que también forma parte de la Red Natura 2000 y del Geoparque Comarca de Molina-Alto Tajo. Este paisaje se caracteriza por amplias parameras y plataformas, culminadas en torno a 1.400 m de altitud. En esas plataformas, el río Tajo ha excavado un amplio sistema de cañones de origen fluvial. Las minas de todo este entorno se ubican en la parte superior de las laderas que constituyen los valles y cañones de río Tajo y sus afluentes. La culminación de dichas laderas está formada por cantiles y cornisas desarrolladas sobre rocas carbonáticas, las cuales dan paso a vertientes desarrolladas sobre sustratos de arenas silíceas y caoliníferas y arcillas, recubiertas por coluviones carbonáticos. El clima es mediterráneo templado con veranos secos y suaves con una influencia continental notable. La precipitación media anual es de 780 mm y la temperatura media anual es de 10 °. Los inviernos son largos y fríos, con frecuentes nevadas, y los veranos, secos, con frecuentes tormentas convectivas (precipitaciones de alta intensidad). Las precipitaciones son comunes en primavera y otoño. Los suelos más comunes de la zona son cambisoles calcáricos, leptosoles móllicos y leptosoles réndzicos. La vegetación de este entorno está dominada por bosques de pino negral (*Pinus nigra* subsp. *salzmannii*) y quejigo (*Quercus faginea*), con matorrales como *Genista scorpius* y *Buxus sempervirens*. Los cortados rocosos albergan poblaciones de águila real, águila perdicera, halcón peregrino, alimoche, buitres leonados y búho real. Y en las masas arboladas aparecen azores, gaviñanes, águilas calzada y culebrera, ratoneros, arrendajos, pito real, tejones, garduñas, comadreja, ginetas, corzos, gamos, ciervos y jabalíes.

La mina alteró significativamente todos los componentes de ese medio físico y natural recién descrito, siendo el efecto más negativo la intensa erosión que tuvo lugar, entre 1990 y 2020, en las escombreras exteriores de la explotación, cuyos sedimentos han estado llegando al río Tajo, dentro del parque natural, hasta la restauración. Con anterioridad a la recuperación que aquí se describe, Martín Moreno *et al.* (2018) midieron tasas de erosión de 353 t ha⁻¹ año⁻¹ en las escombreras exteriores de la mina Santa Engracia (frente a la pista a Poveda) (véase la **figura 1**). Y Zapico *et al.* (2016) midieron concentraciones de sólidos en suspensión en el medio acuático receptor de escorrentías desde estas zonas mineras de 391 g l⁻¹.

Objetivos de la restauración y ecosistema de referencia

El objetivo principal de la restauración ecológica de la mina Santa Engracia, en el marco de LIFE RIBERMINE, ha sido y es reducir y eliminar el impacto hidrológico que ocasionaba la emisión de sedimentos desde este punto hacia la red hidrográfica del río Tajo, mejorando y reparando la funcionalidad de los ecosistemas acuáticos. La base del proceso ha sido la restauración ecológica con base geomorfológica de los huecos y escombreras mineras, lo que está permitiendo, a su vez, iniciar la recuperación de los ecosistemas naturales del entorno en los

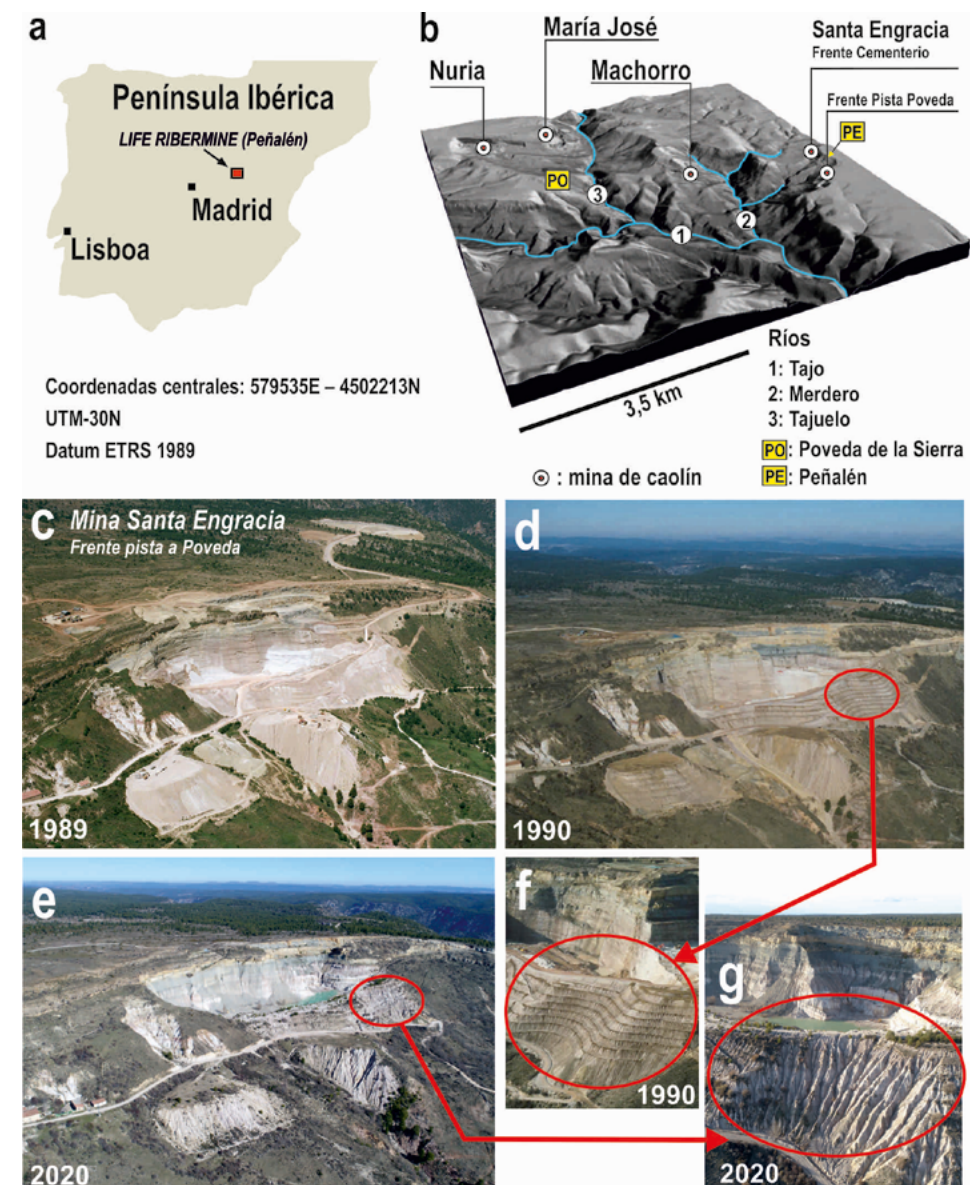


Figura 1. a) Localización del escenario de LIFE RIBERMINE en Peñalén (Guadalajara, sistema Ibérico). b) Minas de caolín en el entorno del Alto Tajo. c) a g) Evolución geomorfológica y erosiva de las escombreras de la mina Santa Engracia. c) 1989 (imagen de Paisajes Españoles), mostrando la fase final de construcción de las escombreras (en pendiente, o ladera). d) 1990, una vez finalizada la explotación y realizadas labores de rehabilitación (imagen de Paisajes Españoles). e) Escenario en 2020, tras treinta años de evolución erosiva (imagen de Diedro). f) y g) Detalles de las imágenes de 1990 y 2020, donde se observa bien la evolución de terrazas [f] imagen de Paisajes Españoles] a badlands [g] imagen de DGDRONE]. **Autoría:** Paisajes Españoles, Diedro y DGDRONE.

espacios afectados por la actividad extractiva. Los ecosistemas de referencia que se pretende restaurar, en el largo plazo, son bosques de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* y *Quercus faginea* sobre vertientes de valles y cañones de la red fluvial del río Tajo, en la comarca del Alto Tajo. El relieve de detalle de estas vertientes incluye redes de drenaje, con cauces efímeros, divisorias, y un sistema de laderas festoneadas. En conjunto, el objetivo es recuperar los ecosistemas descritos en el apartado «Diagnóstico ecológico».

LIFE RIBERMINE espera incrementar la superficie de los HIC: 9530*, 9240 y 6220*, en un total de 27,4 ha. Las comunidades acuáticas afectadas por la emisión de sedimentos se verán beneficiadas también. Estas incluyen especies de interés comunitario como *Chara spp.*, *Salmo trutta*, *Pseudochondrostoma polylepis*, *Barbus comizo*, *Lutra lutra*, *Alcedo atthis* y *Cinclus cinclus*. Los indicadores más importantes del proyecto se refieren a la emisión e inmisión de sedimentos. Así, se pasará de valores de erosión de 353 t ha⁻¹ año⁻¹ (Martín Moreno *et al.*, 2018) a otros similares a los del entorno no afectado por la actividad minera (entre 4 y 15 t ha⁻¹ año⁻¹), valores que ya predice el uso de modelos de erosión como Siberia para este entorno (Hancock, 2021, inédito). Y respecto a la inmisión de sólidos en suspensión, se espera pasar de valores de 391 g l⁻¹ a 24 g l⁻¹ (Zapico *et al.*, 2016). Respecto al número de empleos generados, se prevé contratar a un total de 39 personas, entre técnicos y operarios.

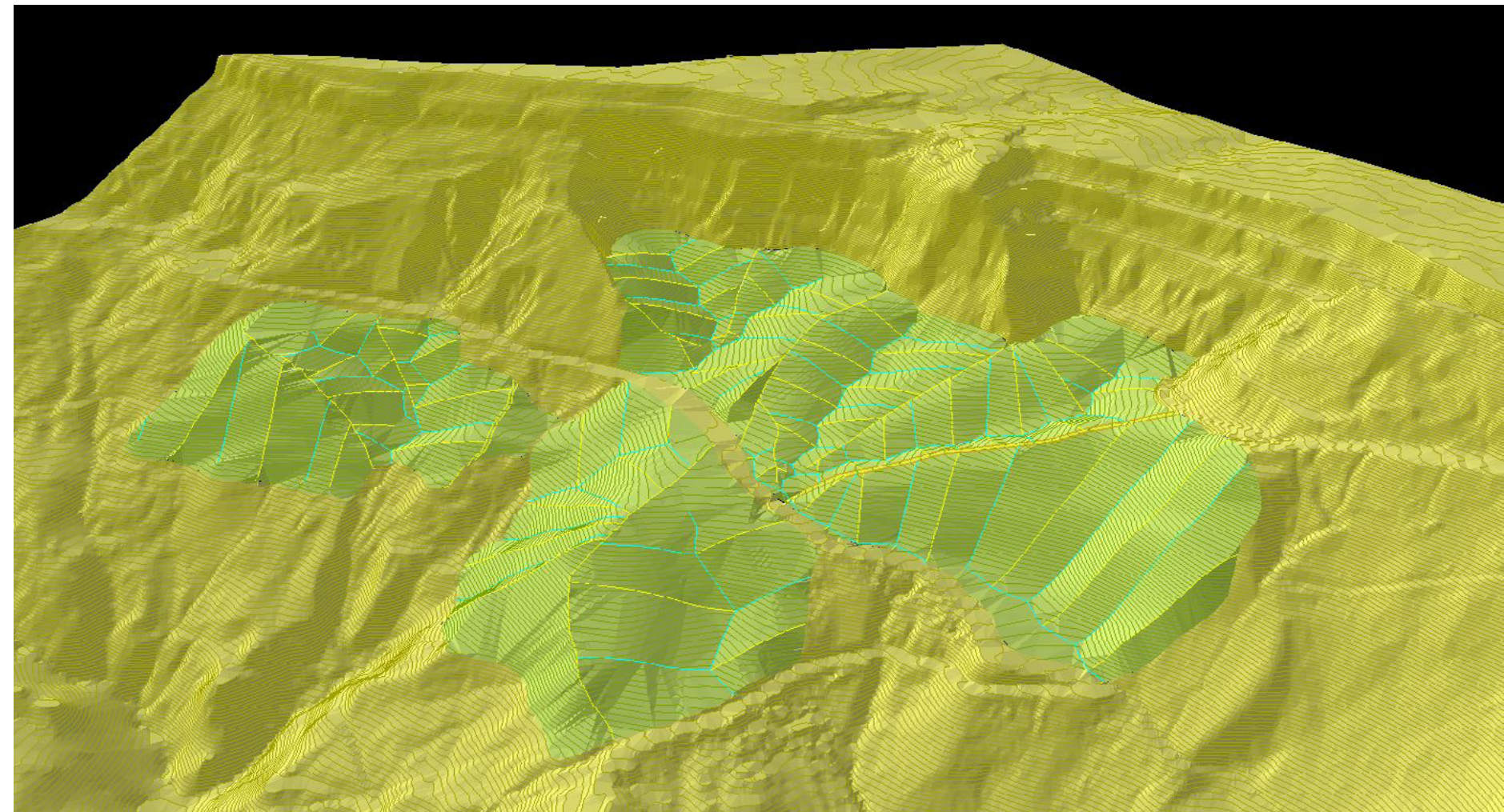
Marco legal

Dada la amplitud y complejidad del proyecto, la legislación que sirve de marco para desarrollar el mismo es amplísima, y su enumeración resultaría prolija. Las dos normas más importantes son:

- Ley 22/1973, de 21 de julio de 1973, de Minas.
- Real Decreto 975/2009, de 12 de junio de 2009, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras.

Acciones de restauración

Respecto a la reconstrucción geomorfológica, las actuaciones de LIFE RIBERMINE en Peñalén han incluido: i) el uso del método GeoFluv-Natural Regrade para el diseño cuencas hidrográficas que replican las naturales en las zonas de escombreras y huecos mineros; ii) el Modelo de Evolución del Paisaje Siberia para simular los procesos erosivos que ocurrirán en los diseños GeoFluv-Natural Regrade; y iii) el método del Talud Royal para replicar escarpes y acantilados naturales en los antiguos frentes de explotación. En la reposición y manejo de suelos, se han utilizado y utilizan formaciones superficiales (coluviones carbonáticos) como «soporte» edáfico, con enmiendas orgánicas de estiércol de ave y oveja y tratamientos dirigidos al incremento de la rugosidad superficial y la descompactación.



➤ **Figura II.** Diseño de reconstrucción geomorfológica de la mina Santa Engracia (frente a la pista a Poveda). Las líneas azules en zigzag constituyen la red de drenaje. Las líneas azules rectas son ejes de vaguadas. Las líneas amarillas largas son las divisorias principales y las líneas amarillas rectas son divisorias secundarias. El punto de partida de este escenario puede verse en la figura I, fotografía e. **Autoría:** LIFE RIBERMINE.

Respecto a la revegetación, que trata de ensamblar un bosque de pinos y quejigos, se incluye una primera fase de introducción de herbáceas y caméfitos para conformar un sustrato estable frente a la erosión y biológicamente funcional; y una segunda de implantación de árboles y arbustos en núcleos (módulos) diferentes según la disponibilidad de agua en las variadas formas de relieve de los paisajes GeoFluv. También se han aplicado técnicas de vanguardia como el acolchado-semillado, el uso de arbustos facilitadores o evitadores de la herbivoría o la aplicación de «biochar».

El carácter pionero y vanguardista de LIFE RIBERMINE respecto a la restauración geomorfológica, en un contexto de restauración ecológica, se pone de manifiesto

por el hecho de que la restauración de la mina Santa Engracia en Peñalén (Guadalajara): i) es el primer proyecto de restauración minera, a nivel europeo, que utiliza el modelo de evolución del paisaje Siberia; y ii) es el primer proyecto de restauración minera, a nivel global, que combina el uso de GeoFluv-Natural Regrade y Talud Royal.

Acciones para la participación de los grupos de interés y salvaguarda de sus intereses

Como todos los proyectos LIFE, RIBERMINE tiene un plan de comunicación muy detallado, que incluye imágenes corporativas y logotipo, paneles explicativos,

roll-up, póster, merchandising, vídeos, publicaciones científicas y divulgativas, visitas guiadas y [página web](#).

Seguimiento de la RE

El seguimiento de las zonas restauradas se está realizando para los tres aspectos de la restauración: topografía, suelos y vegetación. El estudio de la evolución de los relieves construidos se está realizando con fotografías aéreas y levantamientos topográficos mediante técnicas de fotogrametría con dron. Además, se han instalado una serie de diques a la salida de tres cuencas reconstruidas con el método GeoFluv, así como en una cuenca natural, para medir la línea base.

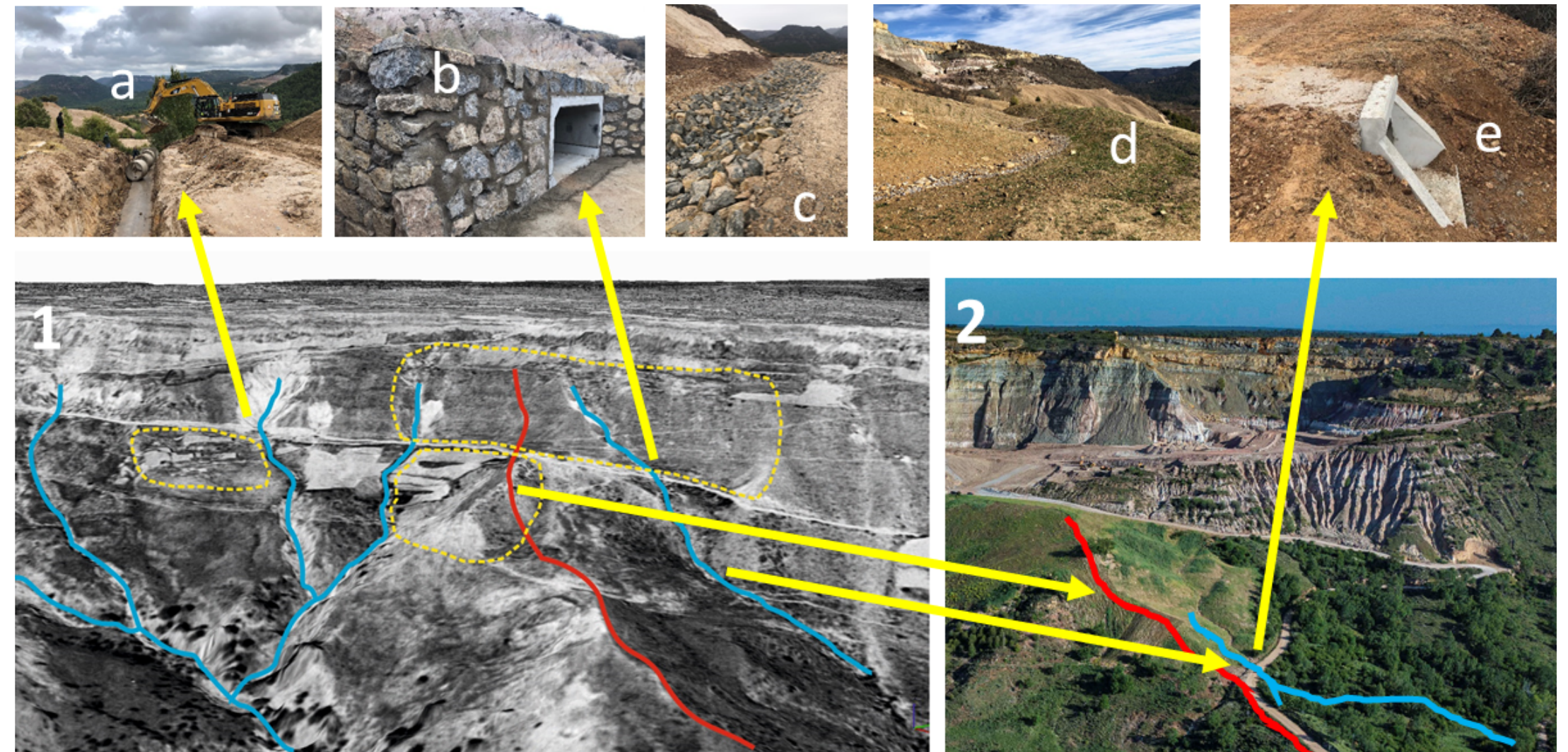
El seguimiento del suelo está enfocado a su caracterización físico-química, mediante los análisis correspondientes de: granulometría (textura por el método de Boyoucos y el método de la pipeta de Robinson), pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, carbonatos, nitrógeno, fósforo y determinación de los cationes K, Na, Ca y Mg por espectrometría de absorción atómica. También se están realizando mediciones de la respiración de los suelos, para estudiar la actividad biológica, que serán comparadas con mediciones en suelos naturales del entorno. La humedad del suelo se medirá mediante reflectometría de dominio de tiempo (*Time Domain Reflectometry*, TDR), para poder evaluar la infiltración del agua en distintas topografías y sustratos.

En el caso de la vegetación, se está realizando el seguimiento anual (campo e imágenes) de la cobertura vegetal, así como de la composición de especies. Asimismo, se ha iniciado un estudio del banco de semillas del suelo para observar su evolución. Respecto de la plantación, se hará el seguimiento de supervivencia y crecimiento de los plantones. Estas observaciones se complementan con las medidas de humedad edáfica y de las propiedades físico-químicas del suelo.

Dada la amplitud del proyecto, este incluye un número importante de indicadores, cuya descripción detallada aquí sería casi inabordable, por motivos de espacio. Para su seguimiento, emplazamos al lector a [la web del proyecto](#), así como a las numerosas publicaciones que está generando el mismo (por ejemplo, Villa *et al.* [2022]). En todo caso, el indicador más importante del proyecto es el de los valores de erosión, que, como se ha señalado, deben pasar de $353 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Martín Moreno *et al.*, 2018) a otros similares a los del entorno no afectado por la actividad minera (entre $4 \text{ y } 15 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

Mantenimiento

El proyecto prevé la elaboración de un plan After-LIFE. Pero, dado que su elaboración es una tarea del mismo, no es posible describir aquí sus detalles. Sin embargo, algunos resultados esperables en los cinco primeros años After-LIFE, muchos de ellos centrados en la transferencia, son: continuar con el seguimiento de los indicadores; definición de los nuevos resultados esperados; acrecentar los beneficios ambientales, incrementando la efectividad de los resultados en



➤ **Figura III.** Recuperación de la conectividad hidrológica en el entorno de la mina Santa Engracia (LIFE RIBERMINE). 1) Imagen IGN de 1956 foto restituida por Jon Ander Mezo e Ignacio Zapico; las líneas amarillas discontinuas muestran la posición que ocuparon el hueco principal y las escombreras de la mina; las líneas azules muestran la red de drenaje anterior a la mina y la línea roja la divisoria principal. **Autores:** Jon Ander Mezo e Ignacio Zapico. 2) Imagen aérea mostrando la reconstrucción de la divisoria y la red de drenaje en un sector. **Autor:** M. A. Langa. a), b) y e) Drenajes construidos en LIFE RIBERMINE, que han recuperado la conectividad hidrológica que se perdió tras la actividad extractiva. c) Detalle de la cuneta reconstruida, con escollera, sin el uso de hormigón; d) Detalle de la red de drenaje reconstruida en las escombreras y huecos mineros, que incluye la réplica de la carga de fondo de lechos fluviales naturales del entorno. **Autor de las fotografías a, b, c, d, e:** José F. Martín Duque.

comparación con los niveles alcanzados al final del proyecto; transferir los resultados del proyecto a, al menos, dos países de la Unión Europea adicionales a los que han sido objetivo en el periodo del proyecto; impartición de cursos sobre el terreno (dos nacionales y dos internacionales); elaboración de cinco jornadas de difusión; ayudar al desarrollo de herramientas análogas en otros enclaves similares de la Unión Europea; y colaborar en nuevas acciones para el entrenamiento de técnicos en los aspectos fundamentales de este proyecto.

Desviaciones

A pesar de que LIFE RIBERMINE, en su escenario de Peñalén, aún se encuentra en proceso de ejecución (faltan algunas fases), y a pesar del corto espacio de tiempo en el que se han desarrollado los procesos de seguimiento, ya ha sido posible extraer algunas lecciones aprendidas, muy valiosas, algunas de ellas surgidas de pequeñas desviaciones. Entre ellas, la más destacada es la siguiente: si

bien la restauración geomorfológica tiene una influencia significativa en el proceso de asegurar la estabilidad erosiva de escenarios y escombreras mineras, esta actuación no es suficiente para garantizar la estabilidad física por sí sola. Por ello, requiere, de modo imprescindible, que todos los nuevos relieves sean cubiertos por sustratos edáficos con propiedades físicas, químicas y enmiendas orgánicas que permitan el desarrollo de la cubierta vegetal. En esta línea, también es crítico el desarrollo rápido de una primera cubierta herbácea, protectora, sobre el suelo desnudo. También se ha constatado la necesidad de que las geoformas diseñadas en entornos CAD, siguiendo principios geomorfológicos, sean construidas de modo fiel a como fueron diseñadas, garantizando, sobre todo, una conexión muy precisa con la altura y el nivel de base al que desaguan las redes de drenaje diseñadas. Por otro lado, la estabilidad de todo el conjunto se ve comprometida si existen entradas de agua desde el exterior (*run on*) que no están debidamente manejadas y controladas. Finalmente, el proyecto ha puesto de manifiesto las ventajas ecológicas del uso de *mulching* de pastos locales y de crear acabados de superficies del suelo no compactadas y de elevada rugosidad (*random roughness*), la cual puede ser obtenida mediante el manejo de la pedregosidad superficial, cubiertas de ramas y hojarasca o la microtopografía.

Evaluación final

Dado que el proyecto está en marcha, y finaliza en marzo de 2024, no es posible realizar una evaluación final del mismo, ni de su grado de ajuste a los objetivos finales. En todo caso, a fecha de elaboración de esta ficha, el proyecto se está desarrollando conforme a lo previsto inicialmente, respecto a sus acciones técnicas y resultados esperados, con la única contingencia de que algunas acciones han variado su temporalidad, siendo la más significativa el retraso de un año en la finalización de los movimientos de tierras dirigidos a la reconfiguración topográfica, lo cual, a su vez, ha repercutido en las acciones de recuperación del suelo y de la cubierta vegetal.

Persistencia de la zona restaurada

Las zonas restauradas se ubican, bien en terrenos comunales de una junta de propietarios del municipio de Peñalén, bien en terrenos municipales. Todo ello en la zona periférica de protección del parque natural del Alto Tajo y en espacios de la Red Natura 2000. A su vez, se prevé la declaración de parque nacional de zonas del actual parque natural, muy próximas a la zona restaurada. Por todo ello, existe un alto grado de certidumbre y garantía en la conservación de las zonas restauradas, que de hecho pasarán a formar parte de espacios naturales protegidos en sus distintas categorías. Con ello, se garantiza una custodia de los mismos por la Administración regional de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.



➤ **Figura IV.** Comparativa entre el paisaje prerrestauración (izquierda) y postrestauración (derecha) de las escombreras exteriores de la mina Santa Engracia.
Autoría: Diedro (izquierda) y M. A. Langa (derecha).

Presupuesto y financiación

Inversión total: 2.934.928 €, con el 55 % de esta cantidad financiado por la Unión Europea ([programa LIFE](#)) y el otro 45 % financiado por los socios: Dirección General de Transición Energética, Gobierno de Castilla-La Mancha, Universidad Complutense de Madrid, Asociación Centro Ciencia Viva de Lousal (Portugal), CAOBAR S.A. y GEACAM. Estos datos se refieren al total del proyecto LIFE RIBERMINE. El presupuesto de todas las actuaciones de restauración de los huecos y escombreras mineras de Santa Engracia (Peñalén) es de 0,7 M €, con el mismo porcentaje de financiación arriba referido (55 % Unión Europea, 45 % socios).

Sistemas de control

Un número importante de los participantes en LIFE RIBERMINE están familiarizados con la Sociedad para la Restauración Ecológica (SER). De hecho, varios de ellos son profesores del Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas, de modo que los estándares y principios de la SER han constituido el eje de buena parte de las actuaciones.

Cualificación del personal

Los estudios técnicos y científicos de LIFE RIBERMINE han contado con varios de los mejores especialistas nacionales, e internacionales, en sus respectivos campos. Los operadores de maquinaria (CAOBAR S. A. y su subcontrata, Félix Moya S. L.) forman el conjunto más experimentado a nivel español, e incluso europeo, sobre restauración geomorfológica. La formación de los especialistas es: Geología, Biología, Ciencias Ambientales, Ingenieros de Montes e Ingenieros de Minas.

Más información

Referencias:

Martín-Moreno, C. *et al.* (2018) Waste dump erosional landform stability-a critical issue for mountain mining, *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, pp. 1431-1450.

Villa, J. de la *et al.* (2022) Más allá de la 'rehabilitación' del espacio natural en minería. La restauración ecológica y paisajística holística de LIFE RIBERMINE, *Actas del VI Congreso Nacional de Áridos*, Oviedo (en prensa).

Zapico, I. *et al.* (2017) Baseline to Evaluate off-Site Suspended Sediment-Related Mining Effects in the Alto Tajo Natural Park, Spain, *Land Degradation and Development*, 28, pp. 232-242.

Web:

https://liferibermine.com/es/homepage_es-2/

Autores: José F. Martín Duque (Universidad Complutense de Madrid); Cristina Martín Moreno (Universidad Complutense de Madrid); María Tejedor Palomino (Universidad Complutense de Madrid); Javier de la Villa Albares (Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha); y M.ª Adoración Solórzano Rodríguez (Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha).



Nombre del proyecto

PROYECTO LIFE16 ENV/ES/000159 TEC-MINE «INNOVATIVE TECHNIQUES FOR FACIES WEALD AND UTRILLAS MINE RESTORATION»

Localización/Ámbito de actuación

La superficie restaurada de la Mina Fortuna se ubica íntegramente en el término municipal de Ademuz (Valencia).

Entidad promotora de las actuaciones de restauración

Generalitat Valenciana-Conselleria de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica.

Entidad/es socia/s del proyecto

Valenciana de Aprovechamiento Energético de Residuos (VAERSA); SIBELCO MINERALES S. A.; Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM); Universidad Complutense de Madrid (UCM); Universidad de Zaragoza (UNIZAR).

Periodo en el que se ha desarrollado el proyecto

Noviembre de 2017-mayo de 2022.

Origen de la perturbación/degradación del espacio

Grupo II. Industria extractiva (minería, dragados, perforaciones, etc.).

Se trata de una zona forestal incluida en la concesión minera denominada «Fortuna» (término municipal de Ademuz, Valencia), donde se han llevado a cabo labores de explotación minera para aprovechamiento de caolín y arenas silíceas durante más de sesenta años.

Ecosistemas afectados

En la zona están representados los ombroclimas mesomediterráneo y supramediterráneo. El supramediterráneo se localiza en el este y el oeste, por encima de los 1.000 m, con la presencia de *Juniperus thurifera* y *Q. rotundifolia*. En cotas más altas, hay la presencia de pastizales hemicriptófitos donde está presente *Juniperus sabina*. En el mesomediterráneo, entre los 900 y los 1.500 m se encuentra *Quercus coccifera*, *Ulex parviflorus* y *Cistus albidus*, que alternan con campos agrícolas y repoblaciones con pinos.

En términos de vegetación potencial, y según la clasificación de Rivas Martínez (1987), correspondería a carrascales mesomediterráneos (zonas bajas y más cálidas), encinares supramediterráneos y sabinares mesosupramediterráneos (sabinas albares) en zonas más frías. Actualmente, debido al uso intensivo del suelo, las zonas cercanas a la cantera están cubiertas de matorral esclerófilo.

En el límite oriental de la cantera se encuentra el parque natural de Puebla de San Miguel. Declarado parque natural en 2007, cuenta con 6.390 ha de superficie, destinadas a la protección de los hábitats allí localizados gracias a su buen estado de conservación por la baja presión antrópica.

Los hábitats de la Red Natura 2000 representados en el parque son:

- 3250. Ríos mediterráneos de caudal constante con *Glaucium flavum*.
- 4060. Brezales alpinos y boreales.
- 4090. Brezales oromediterráneos endémicos con aliaga.
- **5210. Matorral arborescente con *Juniperus spp.***
- 6170. Praderas calcáreas alpinas y subalpinas.
- **6220*. Pseudoestepas con gramíneas y anuales del *Thero-Brachypodietea*.**
- **6420. Praderas mediterráneas de hierbas altas y húmedas del *Molinio-Holoschoenion*.**
- 8210. Laderas rocosas calcáreas con vegetación casmofítica.
- **9240. *Quercus faginea* y *Quercus canariensis* ibérico.**
- **92A0. Bosques en galería de *Salix alba* y *Populus alba*.**
- **9340. Bosques de *Quercus ilex* y *Quercus rotundifolia*.**
- **9530*. Pinares (sub)mediterráneos con pinos negros endémicos.**
- **9560*. Bosques endémicos con *Juniperus spp.***
- 9580*. Bosques mediterráneos de *Taxus baccata*.

(Los hábitats restaurados en el proyecto se destacan en **negrita**).

Motivación para desarrollar el proyecto

Este proyecto surge de la necesidad de mejorar los resultados de las restauraciones de minas y canteras a cielo abierto que afectan a terrenos forestales en ambientes mediterráneos.

Dadas las condiciones climáticas, caracterizadas por una precipitación anual escasa, pero de carácter torrencial, junto con sustratos arenosos y arcillosos (estéril minero), resultado de la actividad extractiva en las facies Weald y Utrillas (lo que implica una alta vulnerabilidad a la erosión hídrica), las prácticas de restauración convencionales no resultan eficaces a la hora de recuperar las funciones de un ecosistema forestal. Como consecuencia, la ocurrencia de problemas severos de origen hidrológico (elevada erosión y baja infiltración), la falta de sustratos edáficos adecuados, y un bajo éxito en la reforestación de estas zonas mediante métodos tradicionales, proporciona como resultado paisajes acarreados, inestables y con escasa diversidad biológica e integración visual.

Desde la Administración valenciana (Generalitat Valenciana, en adelante, GVA) se decidió apostar por un proyecto demostrativo que permitiera probar otras técnicas de restauración y la combinación de ellas, de tal manera que se corrigieran estas deficiencias, al tiempo que aumentara la calidad de las restauraciones en su conjunto. Además, este proyecto ha contado con la participación de la empresa pública VAERSA, tanto para la gestión del proyecto como para la organización de múltiples acciones de transferencia y formación, que han permitido al sector minero, responsable de la implementación de las restauraciones, disponer de un referente adecuado y de la capacitación necesaria para adoptar un nuevo modelo de restauración, más integral y eficiente.

El consorcio, liderado por la GVA, ha contado con expertos en restauración geomorfológica (UCM) y restauración ecológica de ecosistemas mediterráneos degradados (CEAM), cuyos diseños han permitido una gestión integral del agua, tanto por el control experto de la escorrentía como por su aprovechamiento para el desarrollo de una vegetación más diversa y mejor adaptada a los condicionantes de la zona a restaurar.

Asimismo, la participación de la empresa minera SIBELCO ha sido clave. Ha permitido disponer de un emplazamiento representativo de estos escenarios. Su contribución en la implementación de los diseños y su análisis de los resultados, considerando no sólo el aspecto técnico, sino también el económico, valida las soluciones aportadas por este proyecto, como alternativas sostenibles para el sector minero.

Diagnóstico ecológico

Con posterioridad a la finalización de las labores mineras (estado prerrestauración), quedó un espacio degradado. En él se distinguían cuatro zonas:

- Frente de mina, caracterizado por un talud único y de pendiente casi vertical con problemas de estabilidad en la zona de cabecera.
- Zona oeste. Antiguo hueco minero relleno con estériles (arcillas, arenas). Previamente a la restauración, el material había alcanzado e incluso superado la cota original.
- Zona este. Pequeña zona de ladera afectada. Tipo de sustrato: arcillas y coluvión.
- Laguna. Hueco de captación de agua de lluvia, lámina permanente con base de arcilla.

La situación previa a la restauración se caracterizaba por una zona degradada, sin vegetación ni sustrato edáfico que la sustentara, así como por una morfología inestable, caracterizada por un frente residual de elevada altura e inclinación y escombreras de material estéril.

Tras el aprovechamiento de los recursos minerales, la disponibilidad de material para llevar a cabo la restauración se limitaba a acopios de estériles (en este caso, arenas y arcillas). Estos materiales carecían de las propiedades físicas y químicas necesarias para la recuperación de un ecosistema funcional y sostenible. Se disponía también de un pequeño volumen de coluvión, pero insuficiente dada la superficie afectada (13 ha, aproximadamente).

Además, y debido a la situación mencionada, el impacto paisajístico percibido por la población era negativo, lo que contribuía a la oposición social a las actividades mineras en la región.

Objetivos de la restauración y ecosistema de referencia

A partir del diagnóstico ecológico, los principales objetivos de este proyecto han sido:

- Recuperar la funcionalidad del ecosistema forestal afectado e iniciar los procesos ecológicos propios de estos ecosistemas (restauración ecológica).
- Proponer soluciones técnicas que permitan compatibilizar las actividades mineras con la conservación de nuestros 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 promover la colaboración entre Administración, industria y ciencia.
- Ofrecer a la población local nuevas oportunidades para disfrutar de las áreas restauradas.

Marco legal

Este proyecto ha sido cofinanciado por el programa europeo LIFE por su carácter demostrativo e innovador. No obstante, en España, así como en el resto de Europa, la autorización relativa al desarrollo de la actividad minera está sujeta a normativa específica relativa al impacto ambiental derivado de la extracción del mineral, la conservación de lugares y especies de interés, la restauración o rehabilitación del espacio, así como la gestión de los residuos, entre otras.

Principal legislación relativa a la rehabilitación de espacios afectados por actividades extractivas:

- Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras (y sus sucesivas modificaciones).



Junio de 2018



Noviembre de 2019



Septiembre de 2020



Junio de 2021



Figura 1. Evolución de GeoFluv este: junio de 2018, noviembre de 2019, septiembre de 2020 y junio de 2021.
Autoría: VAERSA y Generalitat Valenciana.

- Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular.
- En el caso de la Comunidad Valenciana: Decreto 82/2005, de 22 de abril, del Consell de la Generalitat, de Ordenación Ambiental de Explotaciones Mineras en Espacios Forestales de la Comunidad Valenciana.

Acciones de restauración

En el proyecto Tecmine se han llevado a cabo acciones de restauración en 13 ha de la mina Fortuna (Ademuz, Valencia) y en 14 ha en réplicas que se han desarrollado como transferencia directa del LIFE Tecmine.

Las acciones de restauración llevadas a cabo han consistido en:

Restauración geomorfológica

Frente de Mina: estabilización e integración del frente mediante voladuras en cabecera y remodelado.

Zona este y oeste: remodelación del terreno a partir del método GeoFluv, implementado en el *software* Natural Regrade, basado en la réplica de paisajes similares a los naturales.

Una correcta integración funcional y visual, y una adaptación al medio de los espacios mineros, requiere que las formas del terreno sean «maduras», con topografías suaves y alomadas, y con cauces que replican las redes de drenaje naturales.

Aporte y estabilización del suelo

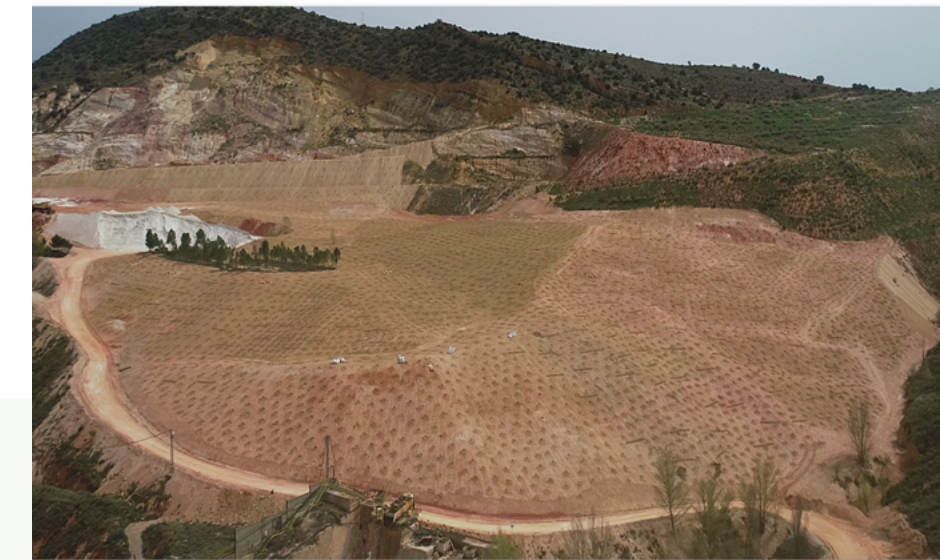
Se han seleccionado sustratos tipo **coluvión** y mezclas de **estériles** de la explotación con aporte de **materia orgánica (compost)**, procedente de actividades como la silvicultura y la depuración de aguas tras un proceso de estabilización y compostaje.

Además, se ha realizado una **siembra** de especies herbáceas, se han colocado **mantas orgánicas y bandas de astillado**, para incrementar la protección del suelo frente a procesos erosivos.

Una adecuada selección de sustratos disponibles, junto con tratamientos de mezcla y mejora, han permitido reconstruir un suelo funcional, que garantice la estabilidad y el desarrollo del nuevo ecosistema.



Junio de 2018



Noviembre de 2019



Septiembre de 2020



Junio de 2021



Figura II. Evolución de GeoFluv oeste: junio de 2018, noviembre de 2019, septiembre de 2020 y junio de 2021.
Autoría: VAERSA y Generalitat Valenciana.

Establecimiento de la vegetación

- Previo a la plantación, se han aplicado técnicas que optimizan el aprovechamiento del agua de lluvia, como las «microcuencas», y otras actuaciones dirigidas a mejorar la supervivencia y crecimiento de las plantas: tubos protectores, hidrogel, enmiendas orgánicas y técnicas de cultivo en vivero, adaptadas a las características funcionales de las especies mediterráneas.

A continuación, se han plantado cerca de **9.000 plantas de 30 especies diferentes** de árboles y arbustos, que representan hasta ocho hábitats distintos, de los cuales tres son hábitats prioritarios (véase el apartado «Ecosistemas afectados»).

Acciones para la participación de los grupos de interés y salvaguarda de sus intereses

Desde el inicio de este proyecto y durante toda su implementación se ha llevado a cabo una **estrategia de comunicación** dirigida a todos los grupos de interés. Para ello, estos grupos se identificaron y agruparon en:

- Empresas mineras, empresas de consultoría forestal y minera, colegios profesionales, Administración pública y comunidad científica relacionada con la restauración ecológica.
- Población local, entidades y asociaciones locales, organizaciones no gubernamentales enfocadas en la protección y conservación del medio ambiente y público en general.
- Escuelas primarias y secundarias, centros de formación y universidades.

Para cada uno de ellos, se diseñó una estrategia específica, identificando los objetivos a alcanzar, así como los mensajes, los canales de comunicación y las actividades a desarrollar más adecuadas en cada caso.

En total, se han llevado a cabo más de 20 conferencias técnicas, más de 17 actividades con estudiantes de los diferentes ciclos y hemos participado en más de 20 eventos (muchos de ellos de ámbito local), dirigidos al público en general, donde se ha transmitido la importancia de la minería, los impactos derivados de esta actividad y las medidas de restauración que aplicamos en el proyecto Tecmine.

Estas actividades han sido complementadas con publicaciones científicas internacionales:

- Turrión, D. *et al.* (2021) Innovative techniques for landscape recovery after clay mining under Mediterranean conditions, *Sustainability*, 13(6), 3439.
- Martín Duque J.F. *et al.* (2019) Geomorphic rehabilitation in Europe: recognition as best available technology and its role in LIFE projects. En: Fourie, A.B. y Tibbett, M. Eds. *Mine Closure 2019*. Perth: Australian Centre for Geomechanics.



Junio de 2018



Noviembre de 2019



Septiembre de 2020



Junio de 2021



Figura III. Evolución de la laguna: junio de 2018, noviembre de 2019, septiembre de 2020 y junio de 2021.
Autoría: VAERSA y Generalitat Valenciana.

- Así como dos guías técnicas de apoyo a la planificación y evaluación de los proyectos de restauración:

- *Guía metodológica para la elaboración de planes y proyectos de restauración de espacios forestales afectados por actividades mineras*. Valencia: Generalitat Valenciana.
- *Guía para el control y seguimiento de los proyectos de restauración de explotaciones mineras en terrenos forestales*. Valencia: Generalitat Valenciana.

Todos ellos disponibles en la [página web de Tecmine](#).

Además, al inicio y al final del proyecto se realizaron encuestas al primer grupo de interés (profesionales y expertos) y al tercer grupo (población local) con el objetivo de evaluar la percepción y el impacto del proyecto, así como la eficacia de la estrategia de comunicación.

Cuestiones dirigidas a identificar el grado de conocimiento de los profesionales sobre las técnicas de restauración disponibles más allá de las convencionales, así como su valoración de las técnicas aplicadas en el proyecto Tecmine, permitieron comprobar la necesidad que hay de conocer otras alternativas que, pese a ser conocidas en el ámbito científico, no lo son en el ámbito de la Administración y la empresa.

Asimismo, el resultado de la restauración de este proyecto en comparación con restauraciones convencionales, así como la participación y colaboración entre la Administración, la empresa y la ciencia, han sido aspectos muy valorados.

Por otro lado, la población local percibe la actividad como positiva, a pesar de los impactos ambientales derivados de ella, ya que contribuye a generar empleo. Sin embargo, la mayoría de los encuestados desconocían que tras la explotación de los minerales existe una obligación de restaurar el espacio afectado. A ello contribuía el hecho de que las imágenes de los espacios restaurados anteriormente no parecían transmitir la idea de un espacio rehabilitado adecuadamente. Tras la restauración llevada a cabo en el proyecto Tecmine, los encuestados aprecian y valoran la mejora paisajística de esta zona en comparación con otras áreas del entorno, también afectadas por la actividad minera.

Además, la gran mayoría de los encuestados considera que el proyecto Tecmine puede contribuir al conocimiento del territorio y su revitalización.

Seguimiento de la RE

En el proyecto se ha establecido un plan de seguimiento y evaluación de los resultados de la restauración, desde la evaluación de la supervivencia y el crecimiento de las especies introducidas hasta la cobertura del suelo, la diversidad de especies o el enriquecimiento en la fertilidad del suelo.

La estabilidad de los espacios restaurados frente a la erosión se ha determinado mediante el estudio (distribución espacial y cuantificación) de la erosión hídrica, en valores de $t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Los informes relativos al seguimiento de los diferentes indicadores y los resultados finales se encuentran disponibles en la [página web del proyecto](#).

Mantenimiento

Transcurridos tres años desde la consecución de los trabajos de restauración, no han sido necesarias labores de mantenimiento. Durante el primer verano, después de la plantación, se aplicaron riegos puntuales de emergencia. Pero tras este periodo no ha sido necesaria ninguna otra labor, más allá de la retirada de los tubos protectores.

Desviaciones

Respecto a la restauración geomorfológica, el resultado global ha sido un claro éxito. Únicamente ha habido pequeñas desviaciones, que no han comprometido el resultado final, pero que, de hecho, han sido extraordinariamente útiles para aprender de las mismas y tratar de evitarlas en proyectos futuros. Estas desviaciones han sido: i) falta de precisión en la conexión de las nuevas redes de drenaje construidas con sus niveles de base; ii) han quedado espacios sin recubrimiento coluvionar; iii) en algunas zonas, no se ha manejado adecuadamente la entrada de escorrentía desde el exterior hacia las zonas restauradas.

La restauración ecológica no ha presentado desviaciones significativas a destacar.

Evaluación final

En relación con el seguimiento hidrológico y geomorfológico del ecosistema, se han obtenido las siguientes conclusiones:

El déficit hídrico es el principal factor limitante para el desarrollo de la vegetación en los ambientes mediterráneos. La erosión hídrica superficial limita el desarrollo de la vegetación por la inestabilidad que genera y porque regueros y cárcavas incrementan el déficit hídrico, al evacuar la escorrentía de las laderas. Por ello, se ha realizado el seguimiento de la erosión en regueros y de la humedad edáfica, como *proxy* de la oferta de agua a las plantas.

El indicador utilizado ha sido la **densidad de regueros** (m/m^2), medida a partir de un modelo digital de elevaciones (en adelante, MDE) obtenido mediante fotografías tomadas con dron; y medidas directas en campo, pues la vegetación desarrollada impidió obtener un MDE preciso.

Para evaluar adecuadamente los datos de erosión registrados en los ecosistemas mineros restaurados hay que tener en cuenta dos aspectos: i) las tasas de erosión disminuyen exponencialmente entre el primero y quinto año, cuando se estabilizan; ii) la densidad máxima de regueros compatible con el desarrollo de la vegetación en el contexto de la mina Fortuna se sitúa entre 0,60 y 0,70 m/m^2 .

Los resultados muestran que las restauraciones geomorfológicas canónicas (GeoFluv) —en las que se ha podido construir una topografía suave y aportar un sustrato de coluvión— son muy poco erosivas. En efecto, en la zona este, la formación de regueros ha sido prácticamente nula y en la zona oeste se han desarrollado pocos regueros (0,15 m/m^2). Sin embargo, en las zonas en las que no se ha podido aplicar la restauración geomorfológica canónica, la densidad de regueros se aproxima al valor umbral. La ausencia de sustrato tipo coluvión también favorece la formación de regueros, aunque en valores dentro del rango de tolerancia.

Respecto a los cauces construidos, la erosión remontante está siendo moderada y compatible con la estabilidad del ecosistema en las restauraciones canónicas de GeoFluv. En la zona de restauración geomorfológica abrupta, la erosión aguas arriba en el canal principal es realmente importante, afectando al 77,4 % de la longitud del canal.

Relativo a la **humedad**, podemos decir que en las zonas restauradas por el método GeoFluv los niveles de humedad son mayores que en las restauradas de manera convencional (talud-cuneta); es decir, ofertan más agua a las plantas.

Por otro lado, el sustrato de coluvión ha tenido niveles de humedad similares a los del suelo natural del ecosistema de referencia (entisol con epipedión ócrico) y siempre superiores a los del sustrato tipo «estéril», lo que indica sus buenas propiedades hídricas. Nuestros resultados revelan que el sustrato controla más la oferta de agua a las plantas que la topografía.

La variedad de los paisajes GeoFluv favorece la heterogeneidad ambiental y, por tanto, la biodiversidad, lejos de la uniformidad presente en las laderas convencionales.

En relación con la restauración ecológica y reforestación, se pueden dar las siguientes conclusiones:

1) Previo al diseño de la restauración, se recomienda realizar una identificación precisa de las diferentes **unidades funcionales de restauración** (UR) del paisaje, según sus condiciones fisiográficas. Características como la pendiente y la orientación condicionan la toma de decisiones sobre las técnicas de estabilización del sustrato, la reforestación a nivel de hoyo de plantación, las densidades de plantación o la selección de especies. Tanto la caracterización de la zona a restaurar como el consiguiente diseño de la restauración son cruciales para mejorar el éxito en términos de supervivencia y crecimiento de las plántulas.

2) Una cuidadosa selección de especies facilita una alta supervivencia y buenas tasas de crecimiento, incluso en los sitios más desfavorables. En este sentido, la elección de referencias ecosistémicas adecuadas es crucial para seleccionar las especies nativas apropiadas presentes de forma natural en el entorno de la zona de restauración.

3) La calidad de las plantas, así como la procedencia de las semillas locales junto con la aclimatación de las plántulas antes de la plantación a las condiciones abióticas a través de protocolos de vivero adecuados, promueve mayores tasas de supervivencia y crecimiento, independientemente de las limitaciones climáticas.

4) La aplicación de técnicas de restauración de bajo coste, como las microcuencas, en lugar de sistemas de riego más costosos, o la aplicación de enmiendas orgánicas para aumentar la fertilidad producen un efecto positivo en el establecimiento y crecimiento de las plántulas, reduciendo los costes y el consumo de agua en climas con importantes limitaciones hídricas. Además, la instalación de protectores, o hidrogeles en condiciones específicas, alivia a las plantas de la alta radiación, la desecación y la herbivoría.

5) La siembra de herbáceas permitió alcanzar de manera temprana unos valores adecuados de cobertura vegetal tras las tareas de restauración (> 60 %). Este aspecto es crucial para prevenir los procesos de degradación del suelo y promover la recuperación de los principales procesos ecológicos.

6) La adición de compost en superficie y en el hoyo de plantación en dosis adecuadas permitió alcanzar valores de fertilidad cercanos a los parámetros de referencia y sin problemas asociados.

7) La extensión de coluvión en superficie mejoró las propiedades del suelo en términos de pedregosidad, textura y contenido inicial de nutrientes. Además, este sustrato ha mostrado los valores más bajos de compactación del suelo, permitiendo algunos procesos ecológicos importantes, como la germinación de semillas, la infiltración de agua y el reciclaje de nutrientes.

6) Por último, cabe destacar la importancia de la supervisión y el seguimiento en cada etapa del proceso de restauración. El establecimiento de un programa de seguimiento es clave para evaluar el éxito de la plantación y detectar las etapas críticas que puedan comprometer el éxito de las plántulas, y establecer medidas correctoras en caso necesario.

Persistencia de la zona restaurada

El periodo del proyecto LIFE Tecmine ha finalizado y, desde mayo de 2022, entramos en el periodo «After-LIFE», en el que, durante tres años más (2022-2025), el consorcio se compromete a una serie de acciones de seguimiento y comunicación. Además, durante este periodo y hasta que el derecho minero de esta concesión caduque, la empresa Sibelco llevará a cabo las labores de mantenimiento y reparación que sean necesarias.

Presupuesto y financiación

Presupuesto total: 1.589.256 €.

Contribución de la Unión Europea: 942.456 €.

Sistemas de control

No.

Cualificación del personal

Previo al desarrollo de las acciones de construcción del proyecto, tanto los técnicos (ingenieros de minas) como los encargados, maquinistas y peones recibieron formación específica en la ejecución de los trabajos por parte de los expertos de la UCM y CEAM. Además, durante la implementación se ha realizado un control de calidad de los trabajos y un seguimiento continuo.

Más información

Web:

<https://agroambient.gva.es/es/web/life-tecmine>

Autores: Juan Uriol Batuecas (Jefe de Servicio de Ordenación y Gestión Forestal de la Generalitat Valenciana); y Cristina Gil Monteso (Generalitat Valenciana).