



REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE EMPLAZAMIENTOS DEGRADADOS POR LA MINERÍA

Marco de Actuaciones Prioritarias
para Recuperar el Mar Menor



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEDIRECCIÓN
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



Marco de Actuaciones
Prioritarias para Recuperar
el **Mar Menor**

REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE EMPLAZAMIENTOS DEGRADADOS POR LA MINERÍA

Marco de Actuaciones Prioritarias
para Recuperar el Mar Menor



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



Marco de Actuaciones
Prioritarias para Recuperar
el **Mar Menor**

Catálogo de publicaciones del Ministerio: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/servicios/publicaciones/>
Catálogo general de publicaciones oficiales: <https://cpage.mpr.gob.es/Catálogo>



MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Título:

Remediación y restauración ecológica de emplazamientos degradados por la minería.
Marco de Actuaciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor.

Coordinación y edición técnica:

Francisco Guil Celada y María Degania Medina Vidal.
(Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación).

Edición General:

Centro de Publicaciones del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
Plaza de San Juan de la Cruz 10. Despacho C-101.3. 28071 Madrid, España.

Edición: 2024.

Fotografía de cubierta e interiores: Francisco Javier Giménez Martín (GRUPO TRAGSA).

A efectos bibliográficos, la obra debe citarse como sigue:

VV.AA. (2024). *Remediación y restauración ecológica de emplazamientos degradados por la minería. Marco de Actuaciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid.

Lengua/s: Español

NIPO: 665-24-085-0.

Índice

Prólogo	4
0.0. Remediación y restauración ecológica de emplazamientos degradados por la minería. Marco de Actuaciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor	5
Bloque 1. Introducción	7
1.1. El Marco de Actuaciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor	8
1.2. La restauración minera como parte de la restauración ecológica. Priorización de problemas ambientales asociados a la minería. Planteamiento de la obra	18
Bloque 2. Sierra Minera: historia, situación actual y experiencias desarrolladas hasta el momento	23
2.1. El medio natural de la Sierra Minera de Cartagena y La Unión	24
2.2. Historia de la actividad minera en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión	41
2.3. Recuperación del patrimonio cultural asociado a la actividad minera	60
2.4. Riesgos ambientales actuales en la Sª Minera de Cartagena-La Unión debidos a procesos de contaminación asociados a instalaciones de residuos mineros abandonadas	74
2.5. Riesgo geotécnico-estructurales en presas de lodos mineros, balsas y escombreras	96
2.6. La situación actual de contaminación en las ramblas de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión	108
2.7. Experiencias previas en la restauración de la Sierra Minera. Preparación del suelo y enmiendas (proyecto FiAmbRes)	130
2.8. Experiencias previas en la restauración de IRMA de la Sierra Minera. Restauración ecológica (proyecto Tetraclinis)	146
Bloque 3. Actuaciones planteadas para la recuperación integral de la Sierra Minera	157
3.1. Catálogo general de soluciones contempladas: remediación de depósitos mineros, espacios degradados y cómo afrontarlos	158
3.2. Aplicación de soluciones a las instalaciones de residuos mineros abandonados (IRMAs): grandes presas y terrenos contaminados	166
3.3. Aplicación de soluciones a la restauración hidrológico-forestal	190
3.4. Aplicación de soluciones al Dominio Público Hidráulico (ramblas mineras)	214
3.5. Seguimiento y evaluación de la efectividad de las actuaciones de restauración	224
3.6. Participación, información y toma de decisiones. Integración de las soluciones planteadas por distintos actores	241



PRÓLOGO

Remediación y restauración ecológica de emplazamientos degradados por la minería. Marco de Actuaciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor

María Jesús Rodríguez de Sancho

Directora General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación
Secretaría de Estado de Medio Ambiente
Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

Los **sistemas naturales** comprenden un tejido de relaciones entre las especies y sus hábitats, que necesita de un equilibrio concreto para desarrollar sus procesos de manera funcional y efectiva. Cuando este equilibrio se interrumpe, los sistemas pierden su capacidad para proporcionar servicios y materiales que son básicos para la vida humana, y de los que se calcula que depende hasta un 50% del PIB mundial. Por lo tanto, la restauración de estos procesos es fundamental para los seres humanos.

La **restauración del medio ambiente** es un deber derivado de nuestro ordenamiento jurídico, recogido explícitamente en el artículo 45 de la Constitución Española, apoyado en el principio de solidaridad colectiva. Al extenso marco legislativo ya existente en la materia, tanto a nivel internacional, como europeo y nacional, se suma la reciente adopción del **Reglamento sobre Restauración de la Naturaleza en la Unión Europea**, que aumenta los compromisos estableciendo objetivos vinculantes de aquí a 2030. Las actuaciones emprendidas en el Marco de Actuaciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor contribuyen sin duda a estos objetivos, con una visión final de devolver el buen estado a la laguna, restableciendo ese necesario equilibrio para asegurar tanto su supervivencia como la dependencia socioeconómica de las poblaciones que habitan en su entorno.

La publicación **Remediación y restauración ecológica de emplazamientos degradados por la minería. Marco de Actuaciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor** es una compilación del trabajo dirigido por la Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación desde el inicio del Marco de Actuaciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor (MAPMM) en 2022.

El fruto de estos dos años de intenso trabajo colaborativo por parte de investigadores, técnicos, y representantes de organizaciones de la sociedad civil, entre otros, se ve reflejado en estos capítulos, en los que se resume la inmensa tarea asignada a la **Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación** como centro gestor de la línea 2.3. del Marco: Actuaciones de restauración de emplazamientos mineros peligrosos abandonados y restauración de zonas afectadas por la minería en la zona de influencia del Mar Menor.

Emprender el trabajo de restauración ecológica en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión empezaba por contar con el mejor conocimiento y técnicas disponibles, como herramienta clave para una restauración exitosa. En esto, ha sido esencial todo el conocimiento generado por los investigadores y colaboradores, a los que extiendo mi más sincera gratitud por su participación, esfuerzo y rigurosidad científica, reflejada a lo largo de los capítulos de esta publicación.

La restauración ambiental requiere, a su vez, de un conocimiento profundo del territorio, contemplando todas sus variables ambientales y socioeconómicas. La Sierra Minera de Cartagena-La Unión ha sido testigo durante siglos de un intensísimo uso del territorio, siendo su identidad, su paisaje y su patrimonio huella de ello. Su historia es un bien valioso que debe transmitirse a las generaciones futuras, como un importante aprendizaje del pasado.

Otra fase esencial en el planteamiento de proyectos de restauración ecológica es establecer un sistema adecuado de seguimiento de las actuaciones, así como el estudio de los ecosistemas de referencia a alcanzar en esta restauración activa a ejecutar en la Sierra.

Las actuaciones de restauración deben contar siempre con la participación de los agentes locales, tanto a nivel de administraciones como de sociedad civil, cuyo papel ha sido fundamental en el desarrollo de los proyectos, recogiendo las aportaciones de todos y todas e incorporando a la sociedad en la toma de decisiones.

Aunque queda un largo proceso por delante, no debemos obviar el camino recorrido hasta ahora y las relaciones y sinergias establecidas, fruto de un trabajo colaborativo en el que todos los sectores han aportado, y con el que esta Dirección General ha expresado su total compromiso.

Por tanto, es también una responsabilidad colectiva que todos los proyectos desarrollados y recogidos en esta publicación lleguen a materializarse por completo, y las generaciones futuras puedan disfrutar de un Mar Menor funcional y sano.



INTRODUCCIÓN

BLOQUE 1

1.1. El Marco de Actuaciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor¹

AUTORES: Francisca Baraza Martínez (Comisionada del Ciclo del Agua y Restauración de Ecosistemas, MITECO), Inmaculada Ramírez Santigosa, Melina Ros Sánchez (Oficina Técnica del Mar Menor, MITECO)

1.1.1. El Mar Menor y su cuenca vertiente

El Mar Menor es una laguna costera hipersalina de 135 km cuadrados de superficie, la mayor de España y más grande de Europa, situada en el sudeste de la península Ibérica, en el litoral de la Región de Murcia.

Está separado del Mediterráneo por una estrecha franja de arena de 22 kilómetros de largo y entre 100 y 800 metros de ancho, denominada La Manga del Mar Menor.



Figura 1. Vista panorámica del Mar Menor y su cuenca vertiente desde la zona sur. Fuente: Google Maps.

Con una profundidad máxima que ronda los 7 metros, sus aguas albergan en su interior cinco islas de origen volcánico que le añaden unos valores ambientales y paisajísticos únicos.

Las características específicas de temperatura, salinidad y viento han generado unas condiciones óptimas para crear un ecosistema de gran valor. No obstante, su configuración no pudo desligarse del sistema hidrogeológico que configura su **cuenca vertiente de 1.316 Km² de superficie** que drena hasta la laguna a través de ramblas

o cauces temporales, y acuíferos, en un sistema interconectado en el que influyen múltiples factores interrelacionados y dinámicos en el tiempo.

Las características singulares del Mar Menor han propiciado la aparición de hábitats de gran valor y abundantes especies singulares y protegidas, como el caballito de mar y el fartet, la nacra y relevantes comunidades de aves acuáticas, lo que ha justificado a su vez, la declaración de diferentes figuras de protección, tanto para la laguna, como para espa-

¹ Este capítulo reproduce parte del texto y las orientaciones recogidas en el Capítulo *Introducción* del Marco de Actuaciones Prioritarias para la Recuperación del Mar Menor (MAPMM) actualizado a fecha abril 2024.

cios naturales presentes en su entorno, y que forman parte del sistema ecológico que aún configuran. Las principales figuras de protección son las siguientes:

Zonas Especiales de Conservación (ZEC):

- Salinas y Arenales de San Pedro del Pinatar.
- Espacios Abiertos e Islas del Mar Menor.
- Cabezo Gordo.
- Mar Menor.

Zonas de Especial Protección para las Aves

- Salinas y Arenales de San Pedro del Pinatar
- Mar Menor

Espacios Naturales Protegidos

- Parque Regional de Salinas y Arenales de San Pedro del Pinatar
- Paisaje Protegido de Espacios Abiertos e Islas del Mar Menor

- Paisaje Protegido Cabezo Gordo

Áreas Protegidas por Instrumentos Internacionales

- Humedal de Importancia Internacional (RAMSAR) "Mar Menor"
- Zona Especialmente Protegida de Importancia para el mediterráneo (ZEPIM) "Mar Menor y Zona Oriental Mediterránea de la Costa de la Región de Murcia"

La gestión de estas figuras de protección se realiza a través del Plan de Gestión Integral de los Espacios Protegidos del Mar Menor y la Franja Litoral Mediterránea de la Región de Murcia, aprobado mediante el Decreto n.º 259/2019, de 10 de octubre, de declaración de Zonas Especiales de Conservación (ZEC), y de aprobación del Plan de gestión integral de los espacios protegidos del Mar Menor y la franja litoral mediterránea de la Región de Murcia (BORM núm. 7 de 19 de Octubre de 2019).

Cuaternario



Plioceno



Messiniense



Tortonense



Figura 2. Esquema de la disposición de los acuíferos en el Campo de Cartagena (el acuífero Cuaternario es el que tiene contacto hidráulico con el Mar Menor). Elaboración: Celia Martínez Hidalgo a partir de García-Aróstegui, J. L., et al. (2012). Ed.: IGME.

1.1.2. Causas de su degradación

A pesar de las figuras de protección, la **falta de una adecuada ordenación del territorio** en la cuenca vertiente y la intensificación de las actividades socioeconómicas, fundamentalmente las agrícolas y ganaderas, han propiciado un el gran deterioro ambiental de la laguna y la pérdida de sus características, valores naturales y culturales. Han sido procesos

complejos, difíciles de revertir, que ponen en riesgo la continuidad del ecosistema del Mar Menor. Esta situación ha sido especialmente significativa en la pérdida de calidad de las masas de agua superficiales y subterráneas por la llegada de exceso de nutrientes y contaminantes y en la modificación de la estructura del drenaje y la calidad de los suelos.

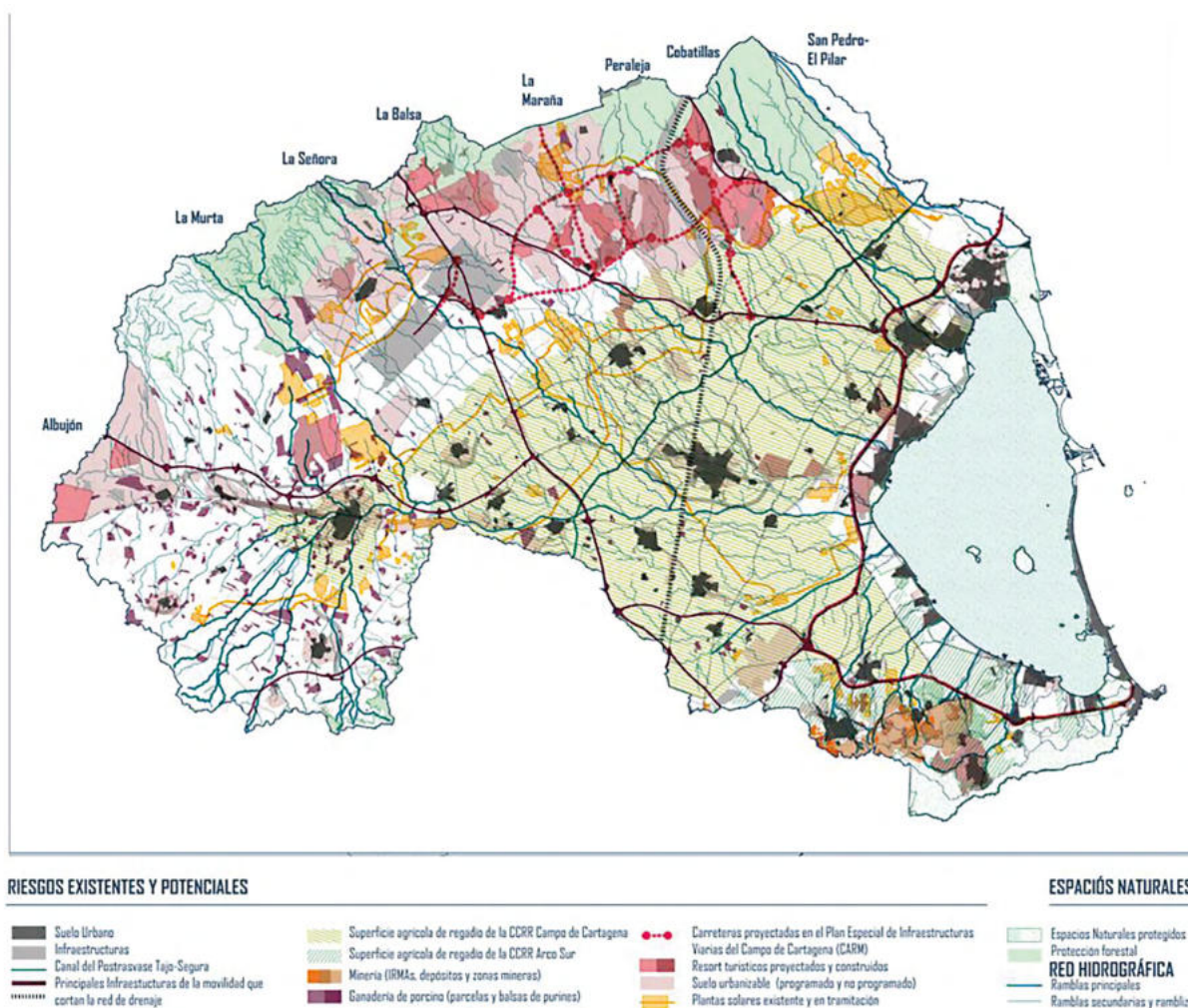


Figura 3. Usos del suelo y riesgos existentes y potenciales en la cuenca vertiente del Mar Menor. Fuente: Celia Martínez Hidalgo a partir de cartografía oficial de la CARM, el MITECO y digitalización sobre ortofotografía PNOA Campo de Cartagena 2022.

La **climatología semiárida** de la zona propicia lluvias torrenciales, que se ven acentuadas por el cambio climático, lo que ha contribuido a su vez al aumento de los arrastres de sedimentos contaminados hacia el Mar Menor y al riesgo de inundaciones en los municipios circundantes de la laguna.

El primero de los procesos que inicialmente afectaron en mayor medida al Mar Menor y a su cuenca vertiente fueron los derivados de los depósitos de estériles

mineros que se generaron con la reapertura de la **minería a cielo abierto en los años 50**, en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. La actividad minera, abandonada, ha seguido provocando problemas debido a la escorrentía y el lixiviado, que llegan hasta la laguna desde la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, a través de los sistemas de drenaje y las ramblas.

Además, el **deterioro generalizado de los cauces y ramblas** en el resto de la cuenca, la de la Rambla del

Albujón y las denominadas como ramblas costeras, ha afectado al comportamiento hidrológico principalmente por la interrupción de la red de drenaje y su ocupación, lo que, junto a la degradación física y química del sustrato ha provocado arrastres de sedimentos, fertilizantes, fitosanitarios, plaguicidas

y metales pesados hacia la laguna, el aumento del riesgo de inundaciones. Los insumos químicos de las actividades agrarias intensivas han propiciado que **las tres masas de agua principales del sistema hidrogeológico, “Mar Menor”, “Rambla del Albujón” y “Campo de Cartagena”, estén contaminadas.**



Figura 4. Arrastres de sedimentos, desde la Sierra Minera, en la desembocadura de la Rambla del Beal al Mar Menor. Figuras más pequeñas: instalaciones mineras abandonadas y depósito de estériles mineros. Fuente: Celia Martínez Hidalgo a partir de fotografías de Joaquín Zamora y Javier Giménez.

Es por ello que el “Campo de Cartagena” está declarado **Zona Vulnerable a la contaminación por nitratos de origen agrario** (ZVN) por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia por primera vez en el año 2001², y, en 2019 se declaró la laguna del Mar Menor como “masa de agua afectada, o en riesgo de estarlo, por la contaminación de nitratos de origen agrario”, dado su evidente estado eutrófico, y se amplió la zona vulnerable del campo de Cartagena a toda la superficie de la cuenca vertiente que afecta a las masas de agua costera del Mar Menor y subterránea³.

La contaminación procedente de la cuenca vertiente, responsable del progresivo deterioro del Mar Menor, propició su colapsó en el año **2016**, con el episodio conocido como **“sopa verde”** donde la proliferación de algas marcó un punto de inflexión en la dinámica del Mar Menor: el 80% de la vegetación desapareció, mientras que el fitoplancton y las macroalgas crecían de forma continua.

² En aplicación de la norma vigente en ese momento, el RD 261/1996, sobre la protección de aguas contra la contaminación producida por nitratos procedentes de fuentes agrarias, y la Directiva 91/676/CEE relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura.

³ Orden de 23 de diciembre de 2019 de la Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente, por la que se acuerda la designación de nuevas zonas vulnerables a la contaminación por nitratos de origen agrario en la Región de Murcia, ampliación de las existentes y la determinación de la masa de agua costera del Mar Menor como masa de agua afectada, o en riesgo de estarlo, por la contaminación por nitratos de origen agrario.

Años 90**Intensificación agrícola y urbanística**

- Proliferación creciente del alga *C. Prolifera* que retiene la concentración de Nitratos ($<0,062$ mg/l).
- Altos valores de fósforo en verano por descarga urbana.
- Mal estado del acuífero

Años 95 - 2000**Reactivación del urbanismo y crecimiento de la ganadería intensiva**

- Más de 8000 Tn/año de residuos ganaderos y 500 balsas.

Años 2010 - 2012**Inicio del desequilibrio sistema**

- Ocupación del 80 % del fondo marino de *Caulerpa prolifera*.
- Fuerte incremento de medusas.
- Niveles crecientes de nitratos y fosfatos.

Año 2015**Descenso de praderas de *C. Prolifera***

- Las praderas de *C. Prolifera* comienzan a descender de forma drástica.
- Se entra en un estado de "crisis eutrófica grave".

Año 2016**Temperatura del agua superior a 30°C • sopa verde**

- Aumento de las concentraciones de nitratos (0,37 mg/L).
- Disminución de la concentración de medusas.
- Aumento del fitoplancton.
- Sombreado del fondo marino.
- Color verdoso de las aguas.



Figura 5. Eventos que han afectado al ecosistema del Mar Menor.

Fuente: Celia Martínez Hidalgo a partir de fotografías de:

1. Antonio Gil en <https://www.laverdad.es/murcia/investiga-legalidad-superficie-20191026010741-ntvo.html>
2. Agencias, <https://www.laopiniondemurcia.es/comunidad/2024/10/26/granjas-cerdos-mar-menor-reforma-ley-110423675.html>
3. Isabel Rubio, marmenormarmayor.es
4. MITECO, chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/prensa/0311_presentacionmm_tcm30-532529.pdf
5. Carlos García Pozo, en <https://www.elmundo.es/papel/historias/2022/12/24/63a59414e4d4d8bb578b45c4.html>

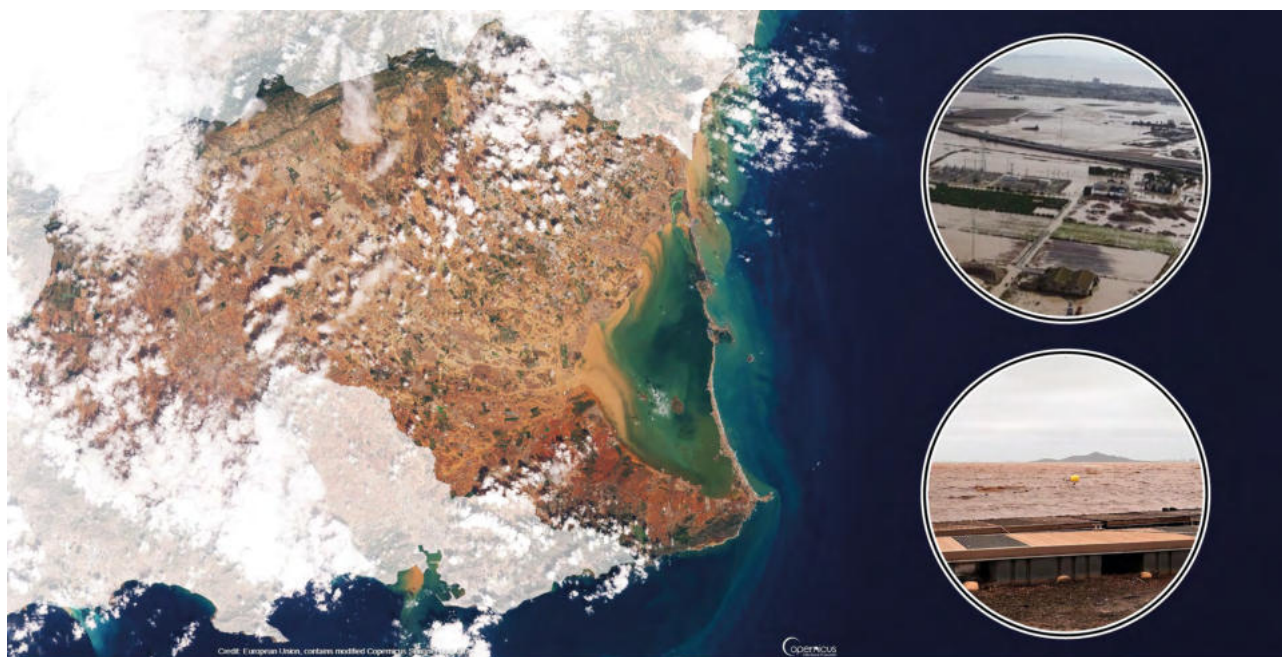


Figura 6. Imagen Satélite Copernicus Sentinel del 13 de septiembre de 2019 de la cuenca vertiente del Mar Menor, donde se aprecia el aporte de agua y materiales arrastrados hasta la laguna. Figuras más pequeñas: inundación de la zona urbana en Los Alcázares y aspecto del Mar Menor con materiales en suspensión en Estrella del Mar (Los Urrutias). Fuente: Celia Martínez Hidalgo a partir de Imagen Satélite Copernicus Sentinel del 13 de septiembre de 2019 de la cuenca vertiente del Mar Menor y fotografías de Marta Piqueras y del MITECO.

En septiembre de **2019**, después de una Depresión Aislada en Niveles Altos **"DANA"** y tras la entrada masiva de agua dulce y partículas en suspensión, se

produjo el primer episodio de muerte masiva de toneladas de peces y crustáceos.



Figura 7. Toneladas de peces y crustáceos aparecen muertos en las orillas del Mar Menor en agosto de 2021. Fuente: MITECO (<https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/mar-menor/problematika-actual.html>).

En verano del **2021** se vuelve a producir un episodio de **mortandad de fauna en el Mar Menor**. Toneladas de peces y crustáceos se acumulan en la orilla de varias zonas del litoral del Mar Menor. Los factores desencadenantes fueron la elevada concentración

de materia orgánica procedente de la cuenca vertiente y una ola de calor cuando los niveles de clorofila eran muy altos, provocando la anoxia de las zonas más profundas.

1.2.3. El Marco de Actuaciones Prioritarias para la recuperación del Mar Menor. Hoja de ruta del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

La necesidad de actuar para recuperar el Mar Menor y su cuenca vertiente impulsó al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) a iniciar en octubre de 2019 una Hoja de Ruta con actuaciones que podría acometer la Administración General del Estado. que, en el segundo semestre del 2021 tras la crisis de

hipoxia en la laguna, y segundo episodio de mortandad de peces, se inició la elaboración del Marco de Actuaciones Prioritarias para la Recuperación del Mar Menor (MAPMM), y se declararon de interés general determinadas actuaciones⁴. La trayectoria hasta el marco actual con una dotación de 675,05 M€, ha sido el siguiente:

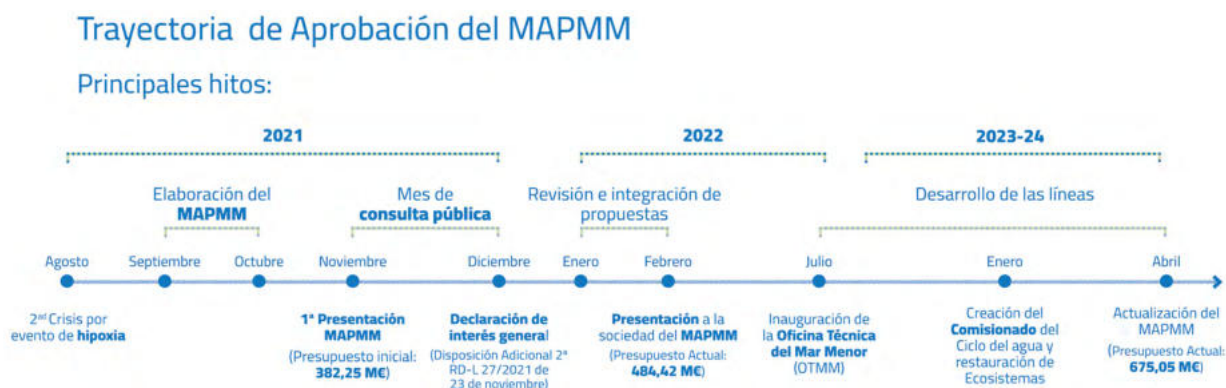


Figura 8. Trayectoria de aprobación y actualización del MAPMM. Fuente: Celia Martínez Hidalgo.

⁴ Disposición Adicional 2ª del RDL 27/2021 de 23 de noviembre.

El MAPMM se ha diseñado para abordar e intervenir en las principales causas que han motivado la eutrofización y la crisis ecosistémica del Mar Menor, contribuyendo a la recuperación de su dinámica natural de la laguna, restauración y renaturalización de las zonas más afectadas y degradadas de la cuenca vertiente.

Se incluyó un esquema de proyectos e intervenciones, priorizando las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) estructuradas en 10 líneas de actuaciones, a ejecutar a través de un total de 35 medidas, destinadas a recuperar la integridad biológica de la laguna y contribuir a reordenar los usos socioeconómicos de su entorno, haciéndolos más compatibles con la preservación del patrimonio natural.

Los principios que sustentan el MAPMM son siete:

- **PRIMERO:** debe priorizarse la restitución de la **legalidad** y las garantías de su cumplimiento en lo que respecta al agua y el Dominio Público Hidráulico y Dominio Público Marítimo Terrestre.
- **SEGUNDO:** deben incluirse actuaciones dirigidas a solucionar o revertir la problemática desde el **origen**.
- **TERCERO:** siempre que sea posible se debe considerar la aplicación de **Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN)**.
- **CUARTO:** las actuaciones deben responder al mejor **conocimiento científico** disponible.
- **QUINTO:** las actuaciones deben ser **complementarias** unas con otras, de modo que el desarrollo paralelo de las mismas multiplique la efectividad del conjunto.
- **SEXTO:** deben estar alineadas **con las normativas europeas, estatales y autonómicas**, como con la Ley de Restauración de la Naturaleza recientemente aprobada por el Parlamento Europeo.
- **SÉPTIMO:** la **participación social** es una prioridad en el proceso del diseño de las actuaciones, así como la **información y comunicación**.

Las 10 líneas y su dotación económica son las siguientes:

LÍNEAS MAPMM	ACTUALIZACIÓN MAPMM
	MIL €
1. Ordenación y vigilancia del dominio público hidráulico	27,650
2. Restauración y mejora ambiental en el ámbito de la cuenca del Mar Menor. Soluciones basadas en la naturaleza	449,500
3. Protección de la ribera del Mar Menor y la ribera mediterránea	37,00
4. Actuaciones complementarias de gestión de inundaciones y reducción de la carga contaminante. Saneamiento y depuración	91,700
5. Conservación de la biodiversidad	14,400
6. Apoyo a la transición de sectores productivos	37,000
7. Reformas normativas	—
8. Mejora del conocimiento y seguimiento	15,800
9. Planificación y visión a medio-largo plazo	0,200
10. Información pública y participación social	1,800
TOTAL	675,050

Tabla 1. Líneas del MAPMM.

Los órganos gestores responsables del MITECO y otros órganos competentes implicados en el desarrollo del MAPMM son: **Dirección General del Agua, Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación, Confederación Hidrográfica del Segura, Dirección General de la Costa y el Mar, la Fundación Biodiversidad y IEO-CSIC** (Ministerio de Ciencia e Innovación).

La labor de coordinación de las actuaciones del MAPMM y de los correspondientes centros gestores se

desarrolla por la **Oficina Técnica del Mar Menor (OTMM)**, unidad no orgánica, funcional, que depende de la Subsecretaría del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y del Comisionado del Ciclo del Agua y Restauración de Ecosistemas.

En la siguiente dirección se encuentran los informes de avances del MAPMM que se actualizan periódicamente: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/mar-menor/novedades-avances.html>.

1.1.4. Modelo de intervención. Medidas para la recuperación de la cuenca vertiente al Mar Menor

Para diseñar y ejecutar el MAPMM, se ha tenido en cuenta la configuración de las subcuencas que integran la cuenca vertiente al Mar Menor, así como los acuíferos, la laguna y la conexión con el Mediterráneo, por ser sistemas que interactúan entre sí.

Para la **intervención física** en el territorio se han considerado tres tramos y ámbitos de la cuenca vertiente diferenciados según funcionalidad.

Por un lado, los **tres tramos** de la cuenca vertiente serían los siguientes:

- La **cuenca alta y media-alta**, con mayores pendientes y cotas superiores a 150 m. Supone el 66% de la superficie total de la cuenca y, mediante las SBN, podría convertirse en la

“esponja” para evitar las inundaciones de los núcleos costeros y la llegada de contaminantes al Mar Menor.

- La **cuenca media-baja**, que sería la franja idónea para detener y disminuir la velocidad de los caudales torrenciales y evitar así su acumulación.
- La **cuenca baja**, en el borde costero, en la que hay que fomentar la función de filtrado y donde se prevé la construcción de un cinturón verde (humedales, filtros verdes y áreas de renaturalización) como espacio multifuncional, que reduzca la carga contaminante y de sedimentos que llegan a la laguna, y potencie la mejora paisajística y de uso público complementario.



Figura 10. Caracterización de la cuenca vertiente del Mar Menor por ámbitos y tramos. Fuente. Celia Martínez Hidalgo.

Las actuaciones a diseñar, que se correspondería con cada uno de esos tres tramos tendrían las funciones principales de ACUMULAR, DETENER Y FILTRAR, en relación con el agua y la contaminación, dependiendo de que la intervención se hiciera en la cuenca alta-media, alta, media o baja.

Por otro lado, las actuaciones se organizan según **tres ámbitos**: las ramblas costeras, la Rambla del Albuñón y las Ramblas Mineras.

De las 10 líneas de actuación, la **Línea 2 “Restauración y mejora ambiental en el ámbito de la cuenca del Mar Menor. Soluciones Basadas en la Naturaleza”** es la que tiene un mayor peso específico y presupuestario, debido a que es donde se recogen las actuaciones

para la intervención física más importante en el territorio, hacia la recuperación de la funcionalidad ambiental de la cuenca vertiente, aplicando siempre que sea posible, Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN).

La importancia de las Soluciones Basadas en la Naturaleza y las razones que han determinado su elección en el modelo de intervención en el territorio, es que pueden actuar en diferentes dimensiones (cauces, barrios, equipamientos, viviendas, etc.), que son actuaciones transversales en cuanto a materias, usos del territorio y normativa, que inciden en el origen del problema y que presentan múltiples beneficios. Además, son intervenciones estructurantes, ya que presentan la capacidad de articular y servir de base de la ordenación territorial.



Figura 11. Estructura territorial de la cuenca vertiente. Fuente. Celia Martínez Hidalgo.

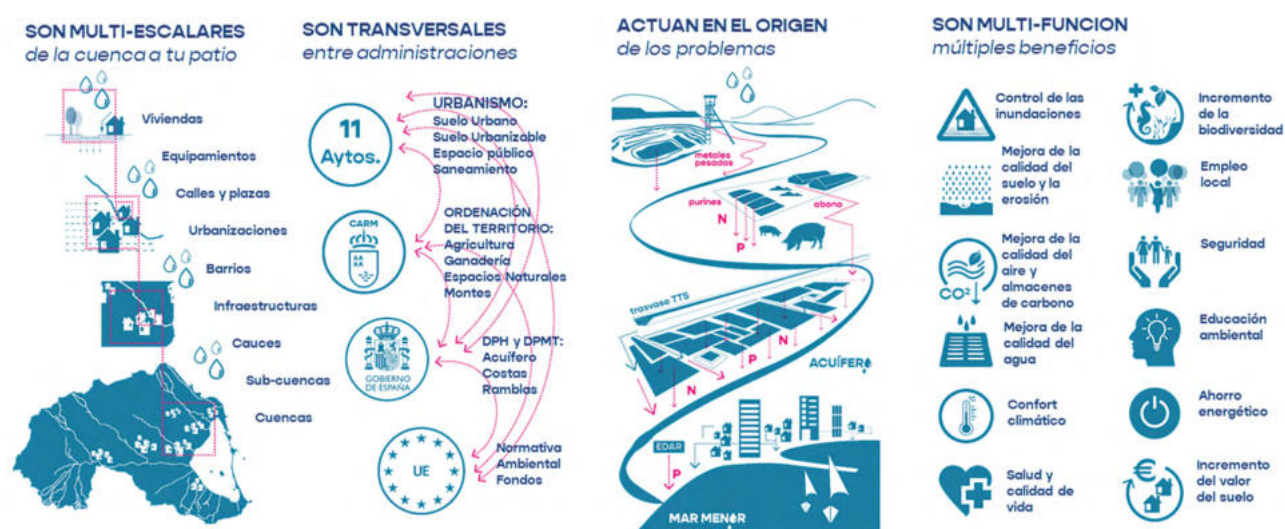


Figura 12. Características de las Soluciones Basadas en la Naturaleza. Fuente. Celia Martínez Hidalgo.

El **objetivo principal** de las medidas que incluye es el de “actuar en el origen para eliminar las afecciones directas y lograr un efecto tampón o amortiguador de impactos y de la carga contaminante de las aguas antes de llegar a la laguna, así como una naturalización de la cuenca vertiente en las zonas que pueden estar disponibles, abordando las causas del estado de eutrofización”.

Las **medidas** y el correspondiente **objetivo específico** que se pretende conseguir, son las siguientes:

- **Medida 2.1 Actuaciones de restauración de ecosistemas en franja perimetral del Mar Menor y creación del Cinturón Verde**, con el objetivo específico de “Recuperar la ca-

pacidad filtrante del entorno, a través de la naturalización de la franja perimetral de la laguna. Para ello se emplearán Soluciones Basadas en la Naturaleza que permitan recuperar ecosistemas y funciones en el entorno inmediato de la laguna y en la cuenca vertiente considerando las funcionalidades propias de la conectividad entre dichas soluciones, el sistema hidrológico y los ecosistemas restaurados”.

(presupuestada en 52 M€)

- **Medida 2.2 Renaturalización y mejora ambiental de las ramblas, gestión de inundaciones y creación de corredores verdes que doten de conectividad a toda la red de dre-**

najes, con el objetivo específico de *“Recuperar la capacidad drenante propia del territorio y el paisaje tradicional mediterráneo, para lo que es preciso recuperar humedales y conservar las ramblas vertientes al Mar Menor cuyos cauces y corrientes temporales se encuentran ocupados, alterados o en un deficiente estado de conservación que incrementa los riesgos de inundaciones y sus consecuencias. Se pretende crear un efecto tampón a los impactos, para lo que se plantea actuar preferentemente en las zonas más próximas a la laguna y en el sistema hidrológico superficial”*.

(presupuestada en 256,70 M€)

- **Medida 2.3 Actuaciones de restauración de emplazamientos mineros peligrosos abandonados y restauración de zonas afectadas por la minería en la zona de influencia del Mar Menor**, con el objetivo específico de *“Recuperar la capacidad de retención de la cuenca en las zonas afectadas por la minería. Esto supone ejecutar actuaciones sobre los procesos de infiltración en el subsuelo de las explotaciones mineras antiguas no restauradas y balsas mineras abandonadas, y actuar sobre las ramblas que reciben las escorrentías contaminadas para evitar su llegada al Mar Menor”*.
(presupuestada en 110,80 M€)
- **Medida 2.4 Recuperación hidrológico forestal de la cuenca alta**, con el objetivo específico de *“Recuperar la capacidad hidrológico-forestal y de acumulación de la zona media alta de la cuenca vertiente, para laminar los efectos que las lluvias torrenciales tienen aguas abajo sobre las poblaciones de la costa”*.
(presupuestada en 30 M€)

Todas estas medidas, se están diseñando y ejecutando de manera que sean complementarias entre sí, y coherentes con los objetivos del resto de medidas del MAPMM. Entre ellas, tanto la **medida 2.1**, como la **medida 2.3**, suponen un reto de gran envergadura y novedoso, y requieren de la obtención de una importante superficie de terrenos para actuar, al no intervenir en Dominio Público.

Por un lado, con la creación del “cinturón verde” se pretende conseguir desarrollar una serie de infraestructuras seminaturales que conecten ecológicamente con los espacios protegidos del perímetro de la laguna, de manera que se asegure un espacio amplio que además de contribuir a la mejorar la capacidad de retención de la cuenca vertiente en su tramo final, contribuya a la mejora paisajística de los entornos urbanos, de la biodiversidad y de la resiliencia del territorio al cambio climático.

Por otro lado, la medida para la restauración de los emplazamientos mineros presentes en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, en su vertiente al Mar Menor, y la corrección hidrológico forestal prevista, supone la mayor intervención que se ha impulsado en España en restauración de espacios degradados y contaminados por minería metálica a cielo abierto, y supondrá la recuperación de la cubierta vegetal en el entorno de las cabeceras de las ramblas mineras con la plantación de especies vegetales que permitan minimizar la erosión y el aporte de sólidos a través de las ramblas y posibilitarán, a medio plazo, la conformación de superficies forestales de interés como hábitats naturales.

1.2. La restauración minera como parte de la restauración ecológica. Priorización de problemas ambientales asociados a la minería. Planteamiento de la obra

AUTORES: Nadia García Ruiz, Jaime Talavera Sánchez, Juan Manuel Domingo (Grupo TRAGSA. Delegación Murcia) Francisco Guil Celada, María Degania Medina Vidal (MITECO).

1.2.1. La restauración minera como parte de la restauración ecológica en la Sierra Minera Cartagena-La Unión

La Sierra Minera de Cartagena-La Unión ha sido un importante centro de actividad minera durante siglos, especialmente en la extracción de plomo, zinc y otros metales (Manteca & Ovejero, 1992). Esta intensa actividad minera ha generado una serie de impactos ambientales, sociales y económicos, asociados a la alteración del territorio y a la existencia de residuos mineros en instalaciones que fueron abandonadas hace décadas, siendo una de las consecuencias los arrastres de metales pesados al Mar Menor.

Las **instalaciones de residuos mineros abandonados** (en adelante, IRMAs), también denominadas comúnmente “balsas” o “depósitos” mineros, se generaron en plantas de tratamiento en los lavaderos de flotación, como residuos del proceso mineralúrgico. Este proceso consistía en varias etapas de trituración, molienda y tratamientos químicos que separaban la “ganga” (material inútil) de la “mena” (mineral que alcanza unas determinadas concentraciones de pureza aptas (CARM, 2018). Durante esos procesos de tratamiento, se producían unos lodos que se vertían directamente al terreno, anegando a menudo ramblas y barrancos y modificando sustancialmente la topografía y las características físico-químicas del suelo.

Del planteamiento expresado en el MAPMM, se desprende la existencia principalmente de dos tipos de terrenos afectados por la minería en la Sierra: las propias IRMAs y sus entornos con terrenos contaminados, además de laderas y vaguadas afectadas por escombreras y fuertes movimientos de tierras (en especial desmontes), por lo general deforestadas y con graves problemas de erosión.

Por ello, la línea 2.3. del MAPMM plantea *“la retirada o tratamiento de los conjuntos de residuos mineros (especialmente las balsas, y priorizando las ubicadas en entornos urbanos y periurbanos, así como las localizadas en las proximidades de los cauces), evitando que los contaminantes se encuentren biodisponibles a corto, medio y largo plazo”*.

Según la [Guía Práctica de Restauración Ecológica publicada por el MITECO en 2018](#), y de acuerdo con la definición de la **Society for Ecological Restoration** (SER, 2004), la restauración ecológica se define como el proceso de asistir a la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido (Mola, I. et al, 2018).

Es importante señalar que la restauración de emplazamientos degradados por la minería es una restauración activa, con intervención directa sobre la estructura del ecosistema degradado con la finalidad de reemplazarlo, rehabilitarlo o restaurarlo para garantizar la existencia de un ecosistema estructurado y funcional. En el caso de la Sierra Minera la restauración pasiva no es posible, debido al elevado grado de deterioro del ecosistema, lo que no permite que la memoria ecológica se ponga en funcionamiento para su auto regeneración. Esto ocurre especialmente en las IRMAs (ver capítulo 2.4.), cuyas concentraciones de metales pesados hace incompatible la regeneración espontánea de la cubierta vegetal y la creación de suelo apto.

Además, la publicación GUÍA PARA LA REHABILITACIÓN DE INSTALACIONES ABANDONADAS DE RESIDUOS MINEROS (MITECO, 2019), recoge que la ma-

yoría de estos terrenos cumplen con la definición de **área drásticamente alterada**: sin cobertura vegetal y sin comunidades animales, con la mayor parte de los horizontes superiores del suelo perdidos, alterados o enterrados. Cuando se habla de la rehabilitación de estos espacios, se pretende obtener un resultado positivo para que los organismos vivos habiten, con un aspecto y productividad establecidos de acuerdo con un plan previo, que sean áreas ecológicamente estables e integradas en el paisaje circundante, sin olvidar que será imposible volver al estado original de los terrenos porque se trata de un territorio minero que lleva siglos siendo explotado y fuertemente transformado.

La restauración activa en las zonas de la Sierra Minera (cabecera de la cuenca vertiente al Mar Menor), generará una restauración pasiva en la laguna, al reducir los impactos que esta recibe, constituyendo una solución de corrección en origen y siguiendo con las recomendaciones del Instituto Español de Oceanografía e investigadores de varias instituciones en su Informe de síntesis de 2019 (Juan Manuel Ruiz et al, 2019).

Por otro lado, la restauración minera puede proporcionar beneficios sociales y económicos significativos para las comunidades locales. La rehabilitación de antiguos lugares dedicados a la minería puede crear oportunidades de empleo en la restauración y gestión de paisajes, así como en actividades recreativas y turísticas asociadas con los ecosistemas restaurados. Esto no solo contribuye al bienestar humano, sino que también fomenta la conexión de las personas con la naturaleza y promueve la conservación a largo plazo de los paisajes restaurados.

Una restauración minera exitosa requiere de la implementación de estrategias integrales y adaptativas que aborden múltiples desafíos asociados con la rehabilitación de estos paisajes. A continuación, se presentan algunas estrategias clave que pueden ser efectivas en este contexto:

- 1) **Evaluación Integral del área:** Antes de iniciar cualquier actividad de restauración, es crucial realizar

una evaluación de la zona minera para comprender plenamente los impactos ambientales y determinar los objetivos de restauración.

- 2) **Participación de las Comunidades Locales:** Involucrar a las comunidades locales en el proceso de restauración puede aumentar la aceptación social de las iniciativas de restauración y garantizar que se tengan en cuenta las necesidades y preocupaciones locales. Además, de profundizar en el conocimiento de cómo era la actividad minera en su origen y comprender los elementos e infraestructuras que la integraban y cómo estos se relacionaban.
- 3) **Uso de Especies Autóctonas:** La utilización de especies vegetales de la zona en los proyectos de restauración, puede promover la biodiversidad y mejorar la resiliencia ecológica de los ecosistemas restaurados.
- 4) **Monitoreo a Largo Plazo:** El monitoreo continuo de las áreas restauradas es esencial para evaluar la efectividad de las medidas de restauración a lo largo del tiempo y realizar ajustes según sea necesario.
- 5) **Restauración Funcional:** En lugar de simplemente intentar replicar la estructura original del ecosistema, la restauración minera debe centrarse en restablecer los procesos ecológicos clave que sustentan la funcionalidad del ecosistema.

Por todo esto, la restauración minera representa un desafío significativo en el campo de la restauración ecológica. Es poco probable que se pueda restaurar completamente un paisaje minero y que este vuelva a su estado original, pero la implementación de estrategias de restauración efectivas puede promover la recuperación de los ecosistemas afectados y mejorar la calidad del medio ambiente. La restauración minera disminuye de forma considerable los riesgos que generan los residuos existentes, contribuye a la conservación de la biodiversidad y la funcionalidad ecológica, y también genera beneficios sociales y económicos para las comunidades locales. Abordar los desafíos de la restauración minera con enfoques innovadores y adaptativos puede hacer avanzar hacia un futuro donde la minería y la conservación ambiental coexistan de manera sostenible.

1.2.2. Situación legal y antecedentes de los emplazamientos degradados por la minería

Según el MAPMM, con objeto de determinar los emplazamientos mineros peligrosos abandonados y proceder a su restauración en la zona de influencia del Mar Menor, se toma de base el [Inventario de instala-](#)

[ciones de residuos mineros clausuradas y peligrosas en España](#) de junio 2022, publicado por el MITECO en aplicación de la Disposición Adicional Segunda del Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre

gestión de residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras, dando así cumplimiento a lo establecido en la Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo de 2006, sobre gestión de los residuos de industrias extractivas.

Además de dicho inventario, se ha tenido en consideración el [Plan de Recuperación Ambiental de Suelos Afectados por la Minería \(PRASAM 2018-2028\)](#), como instrumento que complementa el conocimiento, análisis y evaluación de los riesgos que puedan derivarse de los residuos procedentes de la minería histórica, las zonas de actuación se corresponden por tanto con los depósitos cuya erosión y transporte de sedimentos a través de las ramblas llega al Mar Menor.

Todo ello viene precedido de la Orden de 26 de abril de 2000, del Ministerio de Industria y Energía, en el que se aprobó la **Instrucción Técnica Complementaria 08.02.01 «Depósitos de lodos en procesos de tratamiento de industrias extractivas»**, la cual desarrolla en el Capítulo XII del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.

Concretamente, la disposición transitoria 10 de dicha Instrucción Técnica Complementaria recogía que:

“En el caso de depósitos abandonados con anterioridad a la entrada en vigor de esta disposición el Ministerio de Industria y Energía, en colaboración con las Comunidades Autónomas en el ámbito de sus competencias, elaborará un inventario de estos depósitos en un plazo de tres años. Este inventario recogerá además de los datos básicos del depósito, una evaluación de riesgos y dictamen acerca de su estado actual frente a la seguridad de las personas, la estabilidad geotécnica, los procesos contaminantes, etc., y la definición de las medidas correctoras a aplicar para su adaptación a la presente norma”.

Consecuencia de esta disposición transitoria fue redactado el “Inventario de los depósitos de lodos abandonados en procesos de tratamiento de industrias extractivas en la Región de Murcia, de acuerdo con la Instrucción Técnica Complementaria 08.02.01, del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera”, que fue entregado a la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia en el año 2003.

Esta Instrucción Técnica Complementaria quedó derogada por el 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.

La Dirección General de Energía y Actividad Industrial y Minera, perteneciente a la Consejería de Medio Ambiente, Universidades, Investigación y Mar Menor, viene realizando campañas de inspecciones técnicas en los depósitos de lodos localizados en la Región de Murcia, incluidas en el **Inventario de instalaciones de residuos mineros clausurados y abandonados en España**, de cuyos resultados se ha puesto de manifiesto en algunos casos la necesidad de acometer actuaciones de corrección.

Estas instalaciones, en su mayoría cesaron su actividad hace décadas, desapareciendo en algunos casos las personas o entidades que produjeron los residuos mineros, o siendo imposible su identificación debido al tiempo transcurrido. Actualmente, se está requiriendo tanto a los propietarios de los terrenos como a los presuntos productores de los daños, la restitución de los terrenos afectados, así como la eliminación de las potenciales situaciones de riesgo que se puedan producir en un futuro.

Además, con fecha 2 de agosto de 2020, entraba en vigor la Ley 3/2020, de 27 de julio, de recuperación y protección del Mar Menor, aprobada por la Asamblea Regional de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, donde se propone adoptar medidas normativas urgentes y extraordinarias orientadas a que el Mar Menor recupere y mantenga un buen estado ambiental.

En esta línea, en su Disposición adicional séptima establece:

“Clausura y restauración de instalaciones de residuos mineros abandonadas:

1. *En las instalaciones de residuos mineros abandonadas con anterioridad a la entrada en vigor de esta ley, sin haber sido restauradas y clausuradas, y en las incluidas en el Plan de Recuperación Ambiental de Suelos Afectados por la Minería (PRASAM), la responsabilidad de restauración y clausura corresponderá al productor de los residuos en primer término y subsidiariamente a la persona propietaria del terreno.*
2. *El procedimiento para la disposición y ejecución de las órdenes de clausura y res-*

- tauración, que será iniciado de oficio por la consejería competente en materia de minas, incluidas en su caso la imposición de multas coercitivas y la ejecución subsidiaria, se regirá por lo dispuesto en el artículo 34, salvo el plazo de ejecución voluntaria, que no podrá ser inferior a dos meses ni superior a seis meses.
3. Se declaran de utilidad pública los proyectos de restauración y clausura de instalaciones de residuos mineros abandonadas que se ejecuten de forma subsidiaria por la Administración regional. Dicha declaración lleva implícita, en todo caso, la necesidad de ocupación de los bienes o de adquisición de los derechos afectados, e implica la urgente ocupación, a los efectos de lo establecido en el artículo 52 de la Ley de Expropiación Forzosa”.

Asimismo, el **Real Decreto-ley 27/2021, de 23 de noviembre, por el que se prorrogan determinadas medidas económicas para apoyar la recuperación**, en concreto en su Disposición adicional segunda, declaró de interés general determinadas obras de protección y recuperación ambiental del Mar Menor, especificando que:

1. “Se declaran de interés general de la Administración General del Estado las siguientes obras de protección y recuperación ambiental del Mar Menor:
- a) Restauración de ecosistemas en franja perimetral del Mar Menor y creación del Cinturón Verde.
 - b) Restauración de emplazamientos mineros peligrosos abandonados y restauración de zonas afectadas por la minería en la zona de influencia al Mar Menor.
 - c) Renaturalización y mejora ambiental de las ramblas y creación de corredores verdes que doten de conectividad a toda la red de drenaje, en especial en las ramblas afectadas por la minería. [...]”.

Para la determinación de los emplazamientos mineros a restaurar, además de las consideraciones legales a tener en cuenta para dicha elección de zonas citadas anteriormente, se han incluido otras zonas que no estaban previstas originalmente; que provienen del resultado de numerosas jornadas y reuniones con Asociaciones de vecinos y ecologistas, Plataformas, Ayuntamientos, y otros agentes locales.

1.2.3. Priorización de emplazamientos y planteamiento general de las obras

Con el fin de llevar a cabo la restauración ecológica de la Sierra Minera planteada en el MAPMM, uno de los primeros pasos consistió en definir los tipos de proyectos a realizar, basándose en los objetivos a cumplir y el estado de degradación de los terrenos en los que actuar.

A continuación, se planteó un catálogo de las posibles soluciones a adoptar, se valoraron las diferentes alternativas según su viabilidad técnica, su relación coste-beneficio, y la idoneidad según las analíticas realizadas y los informes solicitados a varias entidades expertas en la materia, además de contar con el asesoramiento del Instituto Geológico y Minero de España, con el que se han diseñado todas las actuaciones a realizar en las IRMAs.

- 1) El primer grupo de proyectos consiste en la **REMEDIACIÓN AMBIENTAL DE RESIDUOS MINEROS Y EMPLAZAMIENTOS AFECTADOS POR LA MINERÍA (IRMAs)**.

Estos proyectos están distribuidos en 9 conjuntos, en los que se ubican terrenos muy degradados, compuestos principalmente por residuos mineros. En estos proyectos encontramos distintos tipos de terrenos y según su situación, se realizan unas u otras actuaciones. Las IRMAs por estar desprovistas de suelo, cobertura vegetal y presentar una elevada acumulación de residuos, puede conllevar estas condiciones a tener riesgos estructurales de los depósitos, lo que implica realizar actuaciones más complejas. En zonas adyacentes a las IRMAs, al ser zonas con una menor degradación, se realizan actuaciones menos complejas como reforestaciones, recuperación de suelos, etc.

Los objetivos de las actuaciones son:

- Reducir los riesgos ambientales asociados a las instalaciones de residuos mineros abandonados mitigando el aporte de residuos mi-

neros a ramblas y su transporte a través de estas al Mar Menor.

- Reducir la contaminación eólica por dispersión de los residuos existentes a núcleos urbanos cercanos.
- Incrementar la estabilidad geotécnica y geoquímica de las instalaciones.
- Recuperar la funcionalidad de los suelos afectados por la minería.
- Restituir el relieve a unas formas más naturales que favorezcan la restauración forestal y la regulación de las escorrentías, al tiempo que reduzcan la erosión.
- Implementar una cubierta vegetal que permita la integración y potenciación paisajística.
- Fomentar la biodiversidad.
- Mejorar el estado químico o cualitativo de las masas de agua superficiales y subterráneas.

2) El otro grupo de proyectos se incluyen en el proyecto **RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL DE LAS CUENCAS VERTIENTES AL MAR MENOR UBICADAS EN LA SIERRA MINERA.**

En este caso, los proyectos se distribuyen en 6 zonas, en las que no se encuentran terrenos tan degradados como en el caso anterior. Son zonas clave para la corrección ambiental en origen, ya que se trata de las cabeceras de las cuencas vertientes a las ramblas. Estas generan muchos arrastres de sedimentos al hallarse desprovistas de cobertura vegetal y contar con laderas de pendientes acusadas, también debido a siglos de intensa actividad minera.

Los objetivos de estas actuaciones son:

- Mitigar la producción de escorrentía y sedimentos en las subcuencas vertientes al Mar Menor.
- Impedir la dispersión eólica de los residuos mineros almacenados en la zona.
- Fomentar la biodiversidad.
- Restaurar el medio natural, recuperando el paisaje forestal y su integración paisajística.
- Recuperación de suelos afectados por la minería.
- Impedir la fragmentación de hábitats, continuidad ambiental entre las distintas actuaciones del Marco de Actuaciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor.
- Lucha contra el cambio climático: Creación y aumento de sumideros de carbono.
- Mejora del estado químico o cualitativo de las masas de agua superficiales y subterráneas.

A estos dos grupos de proyectos gestionados por la DGBBD, y dentro de la coherencia territorial que el MAPMM pretende dar a todas las actuaciones al tratarlas dentro de un mismo documento estratégico, se suman las actuaciones sobre el Dominio Público Hidráulico (ramblas) en la Sierra Minera, competencia de la Confederación Hidrográfica del Segura, dentro de la *Línea 2.2. del MAPMM: Renaturalización y mejora ambiental de las Ramblas y creación de corredores verdes que doten de conectividad a toda la red de drenaje, en especial en las ramblas afectadas por la minería.* Estas actuaciones están recogidas en el capítulo 3.4.

Bibliografía

- Arranz González, J. C., Rodríguez Gómez, V., & Rodríguez Pacheco, R. (2019). Guía para la rehabilitación de instalaciones abandonadas de residuos mineros.
- Bradshaw, A. D., & Chadwick, M. J. (1980). The Restoration of Land. The ecology and reclamation of derelict and degraded land. Blackwell Scientific Publications.
- Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. (2018). Plan de recuperación ambiental de suelos afectados por la minería (PRASAM 2018-2028).
- Egoz, S., Moller, H., & Benyamini, Y. (2018). Challenges of ecological restoration in mining areas. *Ecological Engineering*, 120, 123-132.
- Harris, J. A., Hobbs, R. J., Higgs, E., & Aronson, J. (2016). Ecological restoration and global climate change. *Restoration Ecology*, 24(3), 271-274.
- Manteca, J. I., & Ovejero, G. (1992). Los yacimientos Zn, Pb, Ag-Fe del distrito minero de La Unión-Cartagena, Bética Oriental. En J. García-Guinea & J. Martínez-Frías (Coords.), *Recursos Minerales de España* (pp. 1085-1102). CSIC.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2022). Marco de Actuaciones Prioritarias para la Recuperación del Mar Menor.
- Mola, I., Sopeña, A., & de Torre, R. (Eds.). (2018). Guía Práctica de Restauración Ecológica. Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica.
- Ruiz, J. M., León, V. M., Marín, L., Giménez, F., Álvarez Rogel, J., et al. (2019). Informe de síntesis sobre el estado actual del Mar Menor y sus causas en relación a los contenidos de nutrientes.

**SIERRA MINERA:
HISTORIA, SITUACIÓN ACTUAL
Y EXPERIENCIAS DESARROLLADAS
HASTA EL MOMENTO
BLOQUE 2**

2.1. El medio natural de la Sierra Minera de Cartagena y La Unión

AUTORES: Jose Antonio Navarro Cano, Sara Sánchez Moreno, Marta Goberna Estellés

Dpto. de Medio Ambiente y Agronomía · Instituto Nacional de Investigación y Tecnología agraria y Alimentaria (INIA-CSIC)

2.1.1. Factores que determinan la heterogeneidad ambiental y la diversidad biológica de la Sierra Minera

El tramo de sierra litoral comprendido entre Cartagena y Cabo de Palos presenta unos rasgos físicos afines a los del conjunto del Sureste Ibérico. La comarca se caracteriza por una orientación Suroeste-Noreste de sus sistemas montañosos, que tienen su origen en los intensos plegamientos alpinos que dieron lugar a las cordilleras béticas. Su compleja tectónica caracterizada por diversos mantos de corrimiento que apilaron los materiales originales, ha permitido que afloren tanto rocas magmáticas y metamórficas, como sedimentarias, dando una gran diversidad geológica y minera-lógica al conjunto de la Sierra Minera (IGME, 1974a, b).

La zona tiene un clima de tipo semiárido cálido (clasificación climática de Köppen), marcado por una sequía estival severa, una elevada radiación solar acumulada (media anual de horas de sol = 3174h), evapotranspiración media anual muy alta (1353mm), ausencia de heladas (temperatura media anual = 18.1°C) y unas precipitaciones de carácter torrencial, concentradas en unos pocos días, principalmente en otoño y primavera (precipitación media anual = 295.7mm). Desde el punto de vista bioclimático pertenece al macrobioclima mediterráneo de bioclima xérico oceánico. No obstante, presenta una gran heterogeneidad microclimática, con la existencia de un gradiente de precipitaciones Este-Oeste en escasos kilómetros y fuertes contrastes de humedad entre solanas y umbrías, por el efecto barrera producido por la interceptación de los vientos húmedos de Levante (Ferrer *et al.* 1999).

La accidentada orografía de la zona determina la existencia de todo tipo de formas de relieve (roquedos, laderas, valles, acantilados, barrancos, ramblas, playas, etc.), en muchos casos de pequeñas dimensiones, dado que las cotas máximas de la sierra no superan los 396 m (monte Sancti Spiritu). La red de drenaje presenta rasgos típicamente semiáridos. Predominan las ramblas y barrancos de recorrido in-

ferior a los 5 km y cauce seco durante todo el año, con excepción de los breves episodios de lluvias torrenciales. Existen, no obstante, algunos barrancos con láminas de agua intermitente durante gran parte del año, que tienen su origen en manantiales naturales o seminaturales (antiguos pozos y galerías de mina). El agua de estas fuentes o surgencias (11 en total) presenta unas propiedades físico-químicas muy diferentes en función del origen hidrogeológico de las mismas. Las surgencias que tienen su origen en afloramientos metamórficos o que arrastran residuos mineros se encuentran fuertemente mineralizadas, suelen presentar un pH más bajo que las de origen calizo, así como la presencia de tonos ocres, principalmente por la precipitación de sulfatos de hierro y de calcio (Manteca *et al.*, 2000). Además, existen láminas de aguas calmas de origen endorreico de cierta entidad en el fondo de varias de las cortas de la sierra y temporalmente en algunas balsas mineras, en todos los casos, con aguas de pH ácido.

Junto a los rasgos físicos mencionados y a la influencia biogeográfica norteafricana, la diversidad ambiental y biológica de la Sierra Minera se ve condicionada por los factores antrópicos de degradación. Por su estratégica posición geográfica en el Sureste Ibérico, así como por sus peculiaridades ambientales en el mediterráneo occidental (yacimientos minerometálicos, laguna del Mar Menor), la comarca ha recibido en los últimos 3000 años influencias fenicias, púnicas, romanas, visigodas y musulmanas, con el consiguiente enriquecimiento cultural y tecnológico. No obstante, estas influencias también han producido notables cambios en el medio natural, lo que se ha traducido en una humanización progresiva del paisaje (minería, cultivos de secano tradicional, talas, incendios, presión ganadera, presión urbanística, agricultura intensiva de regadío). Sin embargo, estos procesos históricos de antropización pue-

den considerarse reversibles, dado el largo periodo de tiempo que abarcan. No así la reactivación de la minería entre 1842 y 1991, excepcionalmente destructiva en la segunda mitad del Siglo XX, debido a la introducción del sistema de explotación a cielo abierto en la zona en 1957. Este hecho ha reducido el paisaje de la sierra minera a un conjunto de terreras, cortas, balsas y es-

tructuras mineras (pozos, minas, lavaderos, edificios accesorios), que se extienden a lo largo de, al menos, 5000 ha. de un total 11400 ha. de Sierra Minera. Estos factores de degradación severos, han contribuido a una fragmentación paisajística, creando un mosaico de ecosistemas artificiales, seminaturales y naturales que forman hábitats para las comunidades biológicas.



Figura 1. Tramo de costa acantilada entre el Monte de Las Cenizas y Cabo de Palos. El fuerte contraste entre las laderas de solana que miran al mar, cubiertas de matorral y el pinar de umbría pone de manifiesto la importancia de la orientación SO-NE y de la accidentada orografía en la creación de microambientes que se benefician de la reducción de la radiación y de la humedad de los vientos húmedos de Levante.

Unidades paisajísticas

En la Sierra Minera se reconocen 16 unidades paisajísticas. Cada una de estas unidades está caracterizada por una o varias formaciones vegetales que constituyen hábitats para el conjunto de las comunidades biológicas. Un hábitat se define como el conjunto de comunidades vegetales que conforman un tipo de ecosistema determinado, adaptado a unas condiciones físico-químicas (tipo de material geológico, relieve, suelo, orientación, etc.) y que sirven de soporte a otras comunidades biológicas (herbívoros, depredadores, necrófagos, detritívoros y descomponedores).

Las unidades paisajísticas reconocidas en la zona son las siguientes:

Costa sumergida. Fondos marinos caracterizados por la presencia de comunidades biológicas de la zona supra-, medio- e infralitoral, sobre todo tipo de sustratos. En fondos rocosos se presentan comunidades compuestas por todo tipo de organismos (algas, cnidarios, esponjas, moluscos, briozoos, crustáceos, peces). Sobre fondos arenosos destacan las praderas de *Posidonia oceanica*, que también pueden aparecer sobre sustratos arenosos o rocosos y juegan un papel clave como tram-

pas de sedimentos, bombas oxigenadoras y hábitat clave de multitud de comunidades animales y vegetales. También merecen mencionarse otras praderas de fanerógamas marinas como la dominada por *Cymodocea nodosa*, a veces acompañada por *Zostera noltii* y *Ruppia cirrhosa*.

Costa rocosa. Incluye tanto la vegetación supralitoral de acantilados de naturaleza metamórfica o caliza, como las dunas fósiles de calcarenitas. Son zonas con elementos florísticos caracterizados por una cierta adaptación a la pendiente, que limita los procesos edafogenéticos, y la maresía, que condiciona la adaptación a la salinidad de muchas de las especies vegetales que la habitan y provoca en especies leñosas de gran porte un crecimiento achaparrado. Entre las especies más características podemos citar: la zana-horia de mar (*Chritmum maritimum*), diferentes especies del género *Limonium*, *Frankenia corymbosa* y la margarita de mar (*Asteriscus maritimus*).

Playas. Pertenecen en su mayoría al área de Calblanque, a las que hay que sumar pequeñas calas de arena repartidas por el resto de la costa. Se trata de unidades de paisaje caracterizadas por una escasa cobertura vegetal y su movilidad, que resulta fundamental para el establecimiento tierra adentro de dunas y arenales

en contacto con éstas. Entre las especies más características cabe mencionar *Cakile maritima*, *Salsola kali*, *Eryngium maritimum* y *Lotus creticus*, entre otras.

Arenales y dunas. Se incluyen tanto las dunas móviles y semifijas como arenales húmedos cercanos a saladares y salinas. Entre las especies más características de estos ambientes podemos citar *Crucianella maritima*, *Elymus farctus*, *Cyperus capitatus* y el lirio de mar (*Pancratium maritimum*) entre otras, para los arenales móviles, así como *Imperata cylindrica*, diferentes especies de juncos (*Juncus* sp. pl.), *Scirpus holoschoenus*, etc. para los arenales húmedos. Por su distribución geográfica estas unidades de paisaje se encuentran en regresión en toda la costa mediterránea, habiendo sucumbido íntegramente en muchos casos a transformaciones turístico-urbanísticas, tal y como ha ocurrido en La Manga del Mar Menor en los últimos 30 años.

Saladares y estepas salinas. Humedales, criptohumedales salinos estacionales con vegetación crasifolia y estepas salinas, distribuidas estas últimas en la banda más alejada del humedal, fuera del ámbito de influencia de la capa freática. El saladar alrededor de las Salinas de Marchamalo y Calblanque representa un buen ejemplo de esta vegetación halófila. Entre las especies más importantes de estos ambientes podemos destacar *Sarcocornia fruticosa*, *Salicornia ramosissima*, *Tamarix boveana*, *Suaeda vera*, *Atriplex halimus* y *Atriplex glauca*. Son también frecuentes *Halimione portulacoides*, *Dittrichia viscosa* y diferentes especies de juncos. En la Sierra Minera, las estepas salinas en torno a estos saladares suelen estar constituidas por especies del género *Limonium*, el albardín (*Ligeum spartum*), *Artemisia barrelieri*, *Salsola papillosa*, etc.

Vegetación de ramblas y fondos de barranco. En la Sierra Minera tan solo algunos tramos de ramblas, barrancos y vaguadas presentan ejemplos de galerías termomediterráneas de cauces temporales, caracterizadas por el adelfar de *Nerium oleander*, que suele ir acompañado por otras especies de arbustos como el mirto (*Myrtus communis*), juncos, la pegamoscas (*Dittrichia viscosa*), así como un estrato herbáceo importante. Destacan en la sierra los ejemplos de la Rambla de Escombreras y los barrancos del Moro, El Machón y Sancti Spiritu. Esta unidad aparece también de manera fragmentada acompañando a fruticedas y manchas arbustivas de gran densidad y desarrollo en barrancos de fondo de ladera, contrastando con el resto de la vegetación. Se trata de espinares, lentiscales y palmitares con *Maytenus senegalensis* y *Osyris lanceolata*, con numerosas enredaderas (*Clematis* sp. pl., *Lonicera* sp.) a menudo invadidos por la aliaga (*Calicotome intermedia*).

Hábitats rupícolas. Se caracterizan por la ausencia de suelo y fuerte pendiente. Aparece en cortados, roquedos y litosuelos, en su mayoría de naturaleza caliza. La vegetación suele ser muy pobre en cobertura, si bien, es de destacar la gran cantidad de plantas endémicas que habitan en estos ambientes inhóspitos. Merecen ser destacados los endemismos *Centaurea saxicola*, *Teucrium freynii* y *Lafuentea rotundifolia*, además de otras especies tan características de estos medios como el clavel (*Dianthus broteri*), los zapaticos de la virgen (*Sarcocapnos enneaphylla*), o arbustos como el espinoso negro (*Rhamnus borgiae*) o la efedra (*Ephedra fragilis*). Sobre sustrato silicatado, merecen destacarse diversos helechos y briófitos fisurícolas y de rellanos rocosos de los barrancos de Sancti Spiritu, extraordinariamente raros en el contexto regional. A menudo aparecen pequeñas manchas de comunidades primocolonizadoras de rellanos térreos y pequeños prados y herbazales en ambientes subrupícolas dentro de una matriz rocosa principal, con especies como *Sedum* sp. pl., *Satureja obovata* subsp. *canescens*, etc.

Matorrales y tomillares. Abundantes en laderas de solana y umbría históricamente afectadas por la corta, quema o ganadería extensiva. En solana, los tomillares de *Thymus hyemalis*, romerales y jarales de degradación (*Cistus albidus*, *C. clusii*) suelen estar acompañados de *Helichrysum stoechas*, *Phagnalon saxatile*, *Teucrium capitatum gracillimum* y endemismos locales como *Sideritis pusilla carthaginensis*, *Teucrium cartaginense* o *Limonium carthaginense*, así como por ejemplares aislados de palmito, *Periploca angustifolia*, *Maytenus senegalensis* subsp. *europaeus* y *Osyris lanceolata*. En las umbrías es de destacar el importante desarrollo y densidad que pueden alcanzar los aliagares del iberoafricanismo *Calicotome intermedia*. También son frecuentes los densos jarales de *Cistus monspeliensis*, en ocasiones acompañados por *Cistus salvifolius*, que se presentan en orientaciones Norte o Noreste sobre micaesquistos, filitas y cuarcitas al pie de muchos cabezos de la sierra. Se extienden formando grandes manchas desde el Machón hasta Cala Reona. A menudo constituyen un estrato de matorral bajo pequeños claros de pinar denso o bajo pinares aclarados, colonizando viejas pistas mineras en laderas umbrosas, como ocurre en la Peña del Águila, Ponce y Monte de Las Cenizas.

Pastizales perennes. Los espartizales de *Macrochloa tenacissima* forman densas comunidades de solana en muchos cabezos calizos que miran al Mar Menor. Puntualmente, aparecen manchas densas de *Hyparrhenia sinaica* de menor extensión, principal-

mente sobre litosuelos y rocas volcánicas. En umbría destacan los densos pastizales de *Brachypodium retusum* tanto sobre materiales metamórficos como calizos. A menudo también formas densas y extensas manchas bajo el pinar natural o de repoblación. Estos lastonares alcanzan una gran extensión en las laderas y barrancos umbrosos de Sancti Spiritu, en donde aparecen salpicados de pequeñas manchas de coscoja (*Quercus coccifera*), lentisco (*Pistacia lentiscus*), espinos negros (*Rhamnus lycioides*), labiérnagos (*Phyllirea angustifolia*) y madreselvas (*Lonicera implexa*), que pueden interpretarse como restos de la antigua maquia que cubría las laderas más húmedas y sombrías de la Sierra Minera.

Maquia arbustiva. En solana se presentan en forma de matorrales arbustivos de cobertura variable, que

representan la vegetación madura de los pies de cantiles y laderas que miran al mar en el litoral murciano-almeriense. Pueden estar dominados por una o varias especies entre las que destacan el palmito (*Chamaerops humilis*), cornical (*Periploca angustifolia*), *Maytenus senegalensis* subsp. *europaeus* y *Withania frutescens*. Están acompañadas por diversas especies termófilas, como el lentisco, acebuche, *Osyris lanceolata*, esparto, romero, jaras, albaida (*Anthyllis cytisoides*), *Dorycnium pentaphyllum*, *Launaea arborescens* y toda una serie de pequeñas matillas típicas del tomillar cartagenero como *Sideritis marminorensis*, *Teucrium carthagenensis* o *Thymus hyemalis*. En umbría esta maquia se reduce a restos de coscoja, lentisco y espino negro, con escasos palmitos y un estrato de pastizal dominado por el lastón (*Brachypodium retusum*).



Figura 2. Ladera en el barranco del Avenque. La maquia arbustiva con predominio de iberoafricanismos como el palmito (*Chamaerops humilis*) y el cornical (*Periploca angustifolia*) es una unidad paisajística característica de laderas y barrancos de solana de la Sierra Minera, con predominio del hábitat de interés comunitario 5220* y presencia de los hábitats 5334 y 6220*.

Pinares de pino carrasco. Formaciones densas de *Pinus halepensis*, que condicionan una vegetación de sotobosque dominada por especies de sombra. Presentan manchas históricas en los sectores Cabezo de La Fuente-Cabezo del Horno, Peña del Águila-Huerta Calesa-Monte de Las Cenizas, y con menor extensión en El Machón y Sierra de la Fausilla. La vegetación que acompaña a estos pinares está caracterizada por fruticedas, espinares, lentiscares y coscojares, con enredaderas como la zarzaparrilla (*Smilax aspera*), Rubia peregrina, *Clematis cirrhosa*, *C. flammula* y *Lonicera implexa*, aladierno (*Rhamnus alaternus*), acebuche (*Olea europea sylvestris*), Rus-

cus aculeatus o *Euphorbia characias*, junto a jarales mixtos de *Cistus monspeliensis*, *C. albidus* y *C. salviifolius*. Bajo muchos de estos pinares se ha extendido un denso pastizal de *Brachypodium retusum*. En orientaciones más soleadas, sobre suelos más pobres, o en pinares abiertos, los acompañan comunidades heliófilas de degradación (jarales, romerales, espinares y espartizales), que mantienen restos arbustivos de lentisco, coscoja, cornical o arto. Existen también pinares de repoblación que desde los años 70 se establecieron en densidades muy altas en áreas como El Chorrillo (La Unión), Escombreras, La aparecida o Cabezo Ventura, bajo cuyas copas

predomina una alfombra de acículas con escasos acompañantes como *Brachypodium retusum* o *Ballota hirsuta*. Estos pinares de repoblación empiezan a mostrar signos de decaimiento tras episodios de sequía prolongados.

Sabinars de *Tetraclinis articulata*. Constituyen una formación vegetal exclusiva de las sierras orientales de Cartagena y de gran interés biogeográfico en el contexto europeo. En la actualidad se extiende por unas 524 ha en la Sierra Minera (Esteve Selma *et al.* 2019). Está caracterizada por la presencia en forma de bosquetes abiertos de la Sabina mora o Araar, ocupando generalmente litosuelos calizos en exposiciones soleadas, acompañada por el pino carrasco y un cortejo florístico de matorrales y espartizales con presencia de especies termófilas como el palmito (*Chamaerops humilis*), cornical (*Periploca angustifolia*), *Maytenus senegalensis* subsp. *europaeus*, lentisco, acebuche, romero (*Salvia rosmarinus*), diversas jaras, *Dorycnium pentaphyllum* y diversas especies típicas del tomillar cartagenero (*Sideritis marminorensis*, *Teucrium carthaginensis*, *Thymus hyemalis*).

Barbechos, cultivos de secano y campos abandonados. Se trata de unidades heterogéneas con restos de cultivos tradicionales principalmente de cebada o arbóreos (higueras, olivos, algarrobos y en menor medida, almendros). En sus márgenes se observan pies aislados de lentisco, palmito, esparraque-

ras (*Asparagus* sp.) y escobilla (*Salsola genistoides*). Durante el invierno aparecen densas formaciones herbáceas ruderales. Muchos de estos campos una vez abandonados son colonizados por matorrales y pastizales con *Ballota hirsuta* y *Piptatherum miliaceum* como especies más visibles.

Estructuras mineras. Representan casi la mitad de la superficie de la sierra, entre cortas, pantanos de finos, terreras de estériles, antiguos lavaderos y la red de pistas que los comunican. La vegetación es muy escasa en las cortas y terreras, con predominio de *Dittrichia viscosa*. No obstante, se observa un proceso de recolonización por parte del pino carrasco en muchas terreras anexas a las grandes cortas de la sierra, a pesar de la pendiente, por lo que su extensión se va a incrementar en los próximos años. En balsas abandonadas se repite un patrón de colonización primaria en el que se establecen primero en áreas deprimidas carrizales de *Phragmites australis*, seguidos de un anillo exterior de *Tamarix canariensis* y/o *T. boveana* con *Dittrichia viscosa*. A este anillo se le añade una banda externa de *Zygothymus fabago* con parches de *Salsola oppositifolia*, *Atriplex halimus* y/o pino carrasco, y claros entre parches en donde progresivamente se establecen poblaciones de pastizales y matorrales con *Piptatherum miliaceum*, *Hyparrhenia synaica*, *Dittrichia viscosa*, *Paronychia suffruticosa*, *Helichrysum stoechas*, *Lygeum spartum* o *Phagnalon saxatile* entre otras muchas especies.

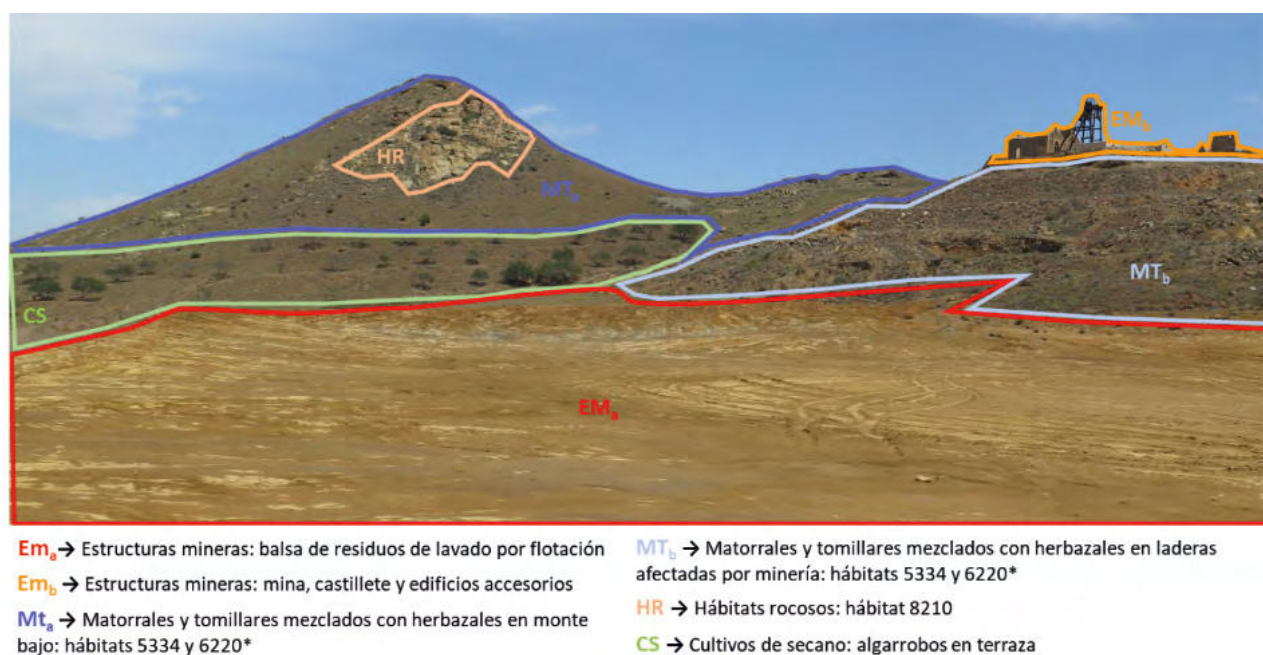


Figura 3. Cabezo Rajao-Pico Agudo. Un ejemplo de paisaje en mosaico de la Sierra Minera, con presencia de varias unidades de paisaje (delimitadas en distinto color), algunas de las cuales están formadas por hábitats de interés comunitario. Se aprecia una influencia general de los efectos de la minería sobre la mayoría de las unidades.

Cultivos intensivos de regadío. Constituyen la unidad paisajística que más ha crecido durante los últimos 20 años en todo el pie de monte de la sierra y ribera del Mar Menor. Los cultivos más habituales en la zona son las verduras de hoja y frutales arbóreos, destacando el cultivo de diferentes variedades de lechuga, melón, alcachofa, brócoli y limón. La intensificación y tecnificación de estos cultivos da lugar a varias cosechas al año dentro de la misma parcela, aunque con un coste ambiental importante por el exceso de agua, salmueras, nitratos, fosfatos y fitosanitarios que en muchos casos drenan al Mar Menor. En el piedemonte de la Sierra Minera estos cultivos se han generalizado durante las últimas dos décadas, ocu-

pando campos de secano tradicional, vegetación natural de piedemonte e incluso áreas de saladar en la ribera del Mar Menor.

Núcleos urbanos y periurbanos. Han crecido ostensiblemente durante las últimas tres décadas. Están caracterizados por un dominio general de sustratos artificiales en superficie (asfalto, cemento, hormigón, enlosados, parterres etc.). Presentan escasa cobertura vegetal, siempre integrada por flora ruderal, viaria e hipernitrófila. A menudo favorecen la colonización por parte de flora exótica invasora como *Nicotiana glauca*, *Acacia* spp., *Cylindropuntia* spp. o *Pennisetum setaceus*, que se extienden por solares abandonados.

2.1.2. La biodiversidad de la Sierra Minera en cifras

La percepción popular que se tiene en relación a las grandes reservas mundiales de biodiversidad, tiende a asociarlas con las selvas tropicales y junglas del planeta (Cuenca Amazónica, África Central, India-Birmania, etc.), ignorando que a pesar de no contar con unos atributos hedónicos (verdor, frescura, frondosidad, humedad), tan valorados intuitivamente, existen ecoregiones del planeta de características áridas o semiáridas que también constituyen auténticas reservas de biodiversidad. La Cuenca Mediterránea y en particular el Sureste de la Península Ibérica, están considerados puntos calientes para la conservación de la biodiversidad a escala planetaria (Mittermeier *et al.*, 1999). Estas áreas poseen, en comparación con otras áreas europeas, una elevada diversidad biológica y una alta concentración de especies endémicas, a la vez que presentan un elevado riesgo de extinción de especies y destrucción de sus hábitats.

Actualmente disponemos del inventario biológico completo para los grupos más populares de especies de la Sierra Minera (flora vascular, fauna vertebrada), pero existe todavía una enorme laguna en el inventario local de grupos biológicos enormemente diversificados en la Península Ibérica, como la meso- y macrofauna de artrópodos, la microfauna del suelo o la microbiota (bacterias, arqueas, hongos) (Tabla 1). Para estos grupos biológicos todavía no es posible realizar una lista de especies de ámbito comarcal, disponiendo solo

de información parcial a partir de trabajos que no tenían como objetivo fundamental inventariar esta diversidad. La diversidad de organismos que viene en el suelo es ingente, y se calcula que hasta un 25% de la biodiversidad del planeta se encuentra bajo tierra. Así, son precisamente los grupos de fauna invertebrada y de microbiota edáfica, los que aportan la mayor parte de la diversidad biológica de la zona. Esta biodiversidad incluye desde microorganismos como las bacterias del suelo, que representan el grupo con mayor número de especies por m² en cualquiera de los hábitats de la sierra, hasta invertebrados como los arácnidos, dentro de los cuáles el grupo de los ácaros es posiblemente el más abundante de la fauna del suelo (Juan-Ovejero *et al.* 2023). También los araneidos, las arañas que fabrican telas con seda, presentan una gran diversidad y una elevada proporción de especies endémicas en el sureste ibérico (Miñano y Esteve 2012). Muchos de estos grupos, en ocasiones desconocidos para el gran público, participan o son responsables de funciones clave en cualquier ecosistema, como la descomposición de materia orgánica o el ciclado de nutrientes (Colin *et al.* 2019), y nos informan acerca de la fertilidad, productividad y complejidad de los ecosistemas. Por ello, son clave en la recuperación natural de ecosistemas perturbados y deben ser utilizados como indicadores en programas de seguimiento de actuaciones de restauración en suelos degradados (Navarro-Cano *et al.* 2017).

DOMINIO	REINO	FILO	SUBFILO	Nº TÁXONES
Bacterias ¹				30,146 / 2,710
Arqueas				por determinar
Eucariotas				por determinar
	Protistas ²			por determinar/17
	Hongos			por determinar
			No liquenizados ²	por determinar/95
			Liquenizados ³	132
	Plantas			867
		Briófitos ⁴		30
		Plantas vasculares ⁵		
			Helechos	12
			Gimnospermas	10
			Angiospermas	
			Monocotiledoneas	158
			Dicotiledoneas	657
	Animales			por determinar
		Nematodos ⁶		74
		Moluscos continentales ⁷		25
		Artrópodos		por determinar
			Insectos	por determinar
			Lepidopteros ⁸	94
			Odonatos ⁹	18
			Coleópteros caraboideo ¹⁰	89
		Cordados		por determinar
			Vertebrados ⁵	221
			Anfibios	4
			Reptiles	19
			Aves	170
			Mamíferos	28

Tabla 1. Se muestran las cifras de riqueza de táxones de la Sierra Minera para los grupos biológicos de los que hay información específica disponible.

¹ Número de taxones bacterianos obtenidos en 92 muestras de suelos mineros de la zona / Promedio de taxones bacterianos por 10 gramos de suelo (Colin et al. 2019).

² Honrubia et al. (2018).

³ Egea & Llimona (1982) entre otras obras;

⁴ Sánchez-Moya & Cano (1999);

⁵ Inventario de los autores a partir de datos propios y literatura disponible;

⁶ Martín et al. (2014);

⁷ García-Meseguer et al. (2017);

⁸ De la Calle et al. (2000);

⁹ Martínez Saura et al. (2019);

¹⁰ Serrano et al. (2021).

Las bacterias constituyen el grupo biológico más diversificado, tanto en términos de número de taxones como de versatilidad metabólica. En el suelo, los filarios bacterianos más abundantes suelen ser las Proteobacterias, Actinobacterias y Acidobacterias, y la Sierra Minera no es una excepción (Colin *et al.* 2019). En términos metabólicos, existen bacterias: 1) fotótrofas, que son capaces de obtener su energía a partir de la luz y el carbono a partir del CO₂ o de fuentes de carbono orgánico, 2) quimiolitótrofas, capaces de utilizar diferentes metales como fuentes de energía, tales como el azufre, el hierro o el manganeso, 3) heterótrofas, que oxidan compuestos orgánicos y cumplen una función esencial como descomponedoras de toda la materia orgánica (de origen microbiano, animal y vegetal) que llega al suelo, y 4) mixótrofas, que son aquellas que pueden variar de estrategia metabólica en función de las condiciones ambientales. Esta gran variedad de estrategias convierte a las bacterias en las grandes colonizadoras de cualquier tipo de suelo. En los suelos más jóvenes y/o altamente contaminados por metales pesados en la Sierra, predominan las bacterias fotótrofas, quimiolitótrofas y heterótrofas altamente resistentes al estrés (por su capacidad de esporular, formar paredes celulares resistentes, tener mecanismos de reparación del ADN, etc.). Se trata de organismos de los filarios Chloroflexi, Cyanobacteria, Gemmatimonadetes, así como Actinobacterias de los órdenes Acidimicrobiales, Solirubrobacterales, Rubrobacterales o Gaiellales (Colin *et al.* 2019). En los suelos bajo una vegetación más desarrollada, con mayor cantidad de recursos orgánicos, estos organismos dejan paso a comunidades más diversas dominadas por heterótrofos de los filarios Proteobacteria, Acidobacteria y Planctomycetes. Específicamente, se detecta un gran aumento de organismos pertenecientes a los órdenes Rhizobiales, Xanthomonadales, Legionellales y Myxococcales, que son capaces de realizar funciones ecológicas muy relevantes, tales como la fijación de nitrógeno, el control de organismos fitopatógenos, la solubilización de fosfatos o la producción de fitohormonas y enzimas (Colin *et al.* 2019).

Entre la gran diversidad de invertebrados que habitan en el suelo, los nematodos son probablemente los más abundantes. Se calcula que cuatro de cada cinco animales del planeta son nematodos, y sus abundancias oscilan entre unas pocas docenas y varios miles de nematodos en 100 g de suelo. Además de extraordinariamente abundantes, los nematodos son también especialmente diversos, con un alto número de especies que presentan también una gran diversidad funcional. Es especialmente relevante su diversidad trófica, ya que ocupan múltiples posiciones en la red trófica edáfica. Así, muchos nematodos se alimentan

de bacterias y de hongos, regulando de forma activa las abundancias de microorganismos del suelo y modulando por tanto procesos ecológicos como el ciclo de nutrientes y la fertilidad del suelo. Otros nematodos se alimentan de las raíces de las plantas, afectando al crecimiento vegetal y provocando en ocasiones enfermedades o plagas. Finalmente, hay también nematodos omnívoros y predadores, que se alimentan de otros invertebrados del suelo.

Su gran diversidad taxonómica y funcional ha hecho que los nematodos sean utilizados como bioindicadores del estado de conservación del suelo tanto en sistemas naturales como en sistemas antropizados y sistemas agrarios (Du Preez *et al.*, 2022). Se ha comprobado que la diversidad, abundancia y complejidad de los nematodos en suelos contaminados con metales se relaciona con la intensidad de la perturbación (Salamun *et al.*, 2012). En nuestro país, la contaminación por metales pesados provenientes del accidente minero de Aznalcóllar, que afectó al río Guadiamar y al Parque Nacional de Doñana en 1998, redujo la diversidad y abundancia de nematodos del suelo, que se recuperó de forma notable una vez retirados los lodos tóxicos y llevadas a cabo las actividades de restauración (Sánchez-Moreno y Navas, 2007). El único trabajo publicado hasta el momento sobre el efecto de los metales en los nematodos del suelo en la zona minera encontró que la diversidad y abundancia de nematodos del suelo en las zonas contaminadas es un 40% (en el caso de la diversidad) y un 50% (en el caso de la abundancia) inferior que en las zonas naturales o agrarias de la región (Rodríguez *et al.*, 2014). En estas zonas, se ha encontrado que un 17,3% de los nematodos eran bacterívoros, un 27,5% fungívoros, un 23,7% herbívoros, un 28,5% omnívoros y un 3% predadores (Rodríguez *et al.*, 2014) (**Figura.4**).

Muchas de las formaciones vegetales de la Sierra Minera constituyen hábitats de interés comunitario de la Unión Europea, estando recogidos en la Directiva 92/43/CEE (conocida como Directiva Hábitats), que es la base de la red europea de espacios naturales protegidos (la Red NATURA 2000). En la tabla II.2 se indican los 23 hábitats de interés comunitario presentes en la sierra y las unidades de paisaje en las que aparecen, con especial atención a los hábitats considerados "prioritarios" y por tanto, de protección estricta, que aparecen indicados con un asterisco (*) tras el código oficial del hábitat. Cada uno de estos hábitats incluye uno o varios subtipos de hábitats presentes en la zona, siendo los hábitats 5334 y 6220*, los que presentan mayor diversidad de subtipos presentes en la sierra. Información detallada sobre estos subtipos y su cartografía se puede consultar en Alcaraz *et al.* (2008).

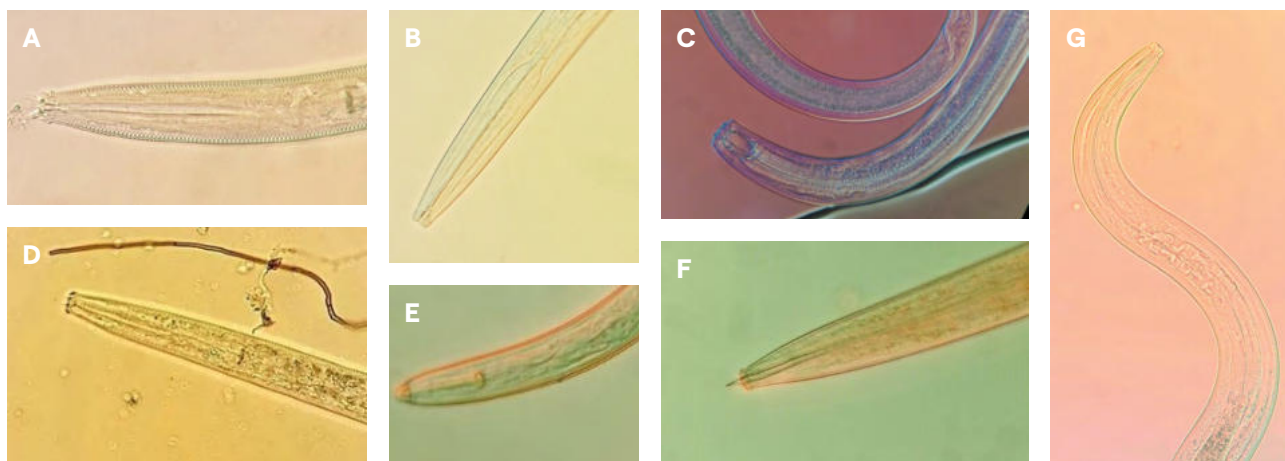


Figura 4. Algunos de los nematodos presentes en los suelos de la Sierra Minera. (A) bacterívoro generalista del género *Acrobeles*, que presenta labios modificados en forma de tentáculos para preda sobre bacterias, (B) bacterívoro oportunista del género *Panagrolaimus*, (C) depredador del género *Clarkus*, (D) bacterívoro generalista del género *Cervidellus*, (E) herbívoro del género *Helicotylenchus*, (F) depredador del género *Labronema*, y (G) depredador de la familia *Nygolaimidae*.



Figura 5. Muestrario de fauna de la Sierra Minera y niveles tróficos de adscripción. (A) protozoo descomponedor *Steomonitis* sp.; (B) isópodo detritívoro *Porcellio ornatus*; (C) arácnido depredador *Argiope lobata*; (D) ácaro parásito *Hyalomma lusitanicum*; (E) miriápodo cazador *Scutigera* sp.; (F) mantis depredadora *Ribetina baetica*; (G) coleóptero herbívoro *Pimelia baetica*; (H) saltamontes herbívoro *Steropleurus* sp.; (I) cucaracha detritívora *Phyllodromica* sp.; (J) coleóptero herbívoro *Buprestis magica*; (K) reptil cazador *Chamaeleo chamaeleon*.

COD. HÁBITAT	DENOMINACIÓN	UNIDAD DE PAISAJE	LUGARES REPRESENTATIVOS
1110	Bancos de arena cubiertos permanentemente por agua marina profunda	Costa sumergida	Playas de Calblanque, Cala Hierro (Cabo de Palos)
1120*	Praderas de Posidonia (<i>Posidonia oceanica</i>)	Costa sumergida	Punta del Cabo de Palos, Cala Reona
1150*	Lagunas costeras	Costa sumergida	Playa de los Nietos, Playa del Arsenal (Mar Menor)
1210	Vegetación anual pionera sobre desechos marinos acumulados	Playas	Cala Reona, Playas de Calblanque
1240	Acantilados con vegetación de las costas mediterráneas con <i>Limonium</i> sp. pl. endémicos	Costa rocosa	Tramo Cala Reona-Calblanque, Cala de Las Mulas, Playa del Gorguel
1410	Pastizales salinos mediterráneos (<i>Juncetalia maritimi</i>)	Saladares y estepas salinas	Saladar de Calblanque, Bahía de Portmán, Marina del Carmolí.
1420	Matorrales halófilos mediterráneos y termoatlánticos (<i>Sarcocornetea fruticosi</i>)	Saladares y estepas salinas	Saladar de Calblanque, Marina del Carmolí.
1430	Matorrales halo-nitrófilos (<i>Pegano-Salsotea</i>)	Saladares y estepas salinas	Entre la Playa de las Cañas y Playa de Calblanque.
1510*	Estepas salinas mediterráneas (<i>Limonietalia</i>)	Saladares y estepas / Arenales y dunas	Interior del saladar de Lo Pollo, alrededores de las Salinas de Calblanque.
2110	Dunas móviles con vegetación embrionaria	Arenales y dunas	Entre la Playa de las Cañas y Playa de Calblanque.
2120	Dunas móviles del litoral con <i>Ammophila arenaria</i> (dunas blancas)	Arenales y dunas	Entre la Playa de las Cañas y Playa de Calblanque.
2210	Dunas fijas del litoral del <i>Crucianellion maritimae</i>	Arenales y dunas	Entre Playa Punta Seca y Playa de Calblanque
5220*	Matorrales arborescentes de <i>Ziziphus</i>	Matorrales y tomillares	Cala Reona/ Cabezo de La Galera/ Barranco del Avenque
5333	Fruticedas termófilas	Vegetación de ramblas y fondos de barranco / Matorrales y tomillares	Cabezo Negro (Calblanque), Cabezo de la Galera y Cabezo del Pino (Portmán). Rambla del Avenque
5334	Matorrales y tomillares termófilos, principalmente semiáridos	Costa rocosa / Saladares y estepas salinas / Matorrales y tomillares / Sabinas de <i>Tetraclinis</i> / Areas afectadas por actividades mineras	Tramo Cala Reona-Calblanque / Alrededores del saladar de Calblanque / Peña del Águila / Sancti Spiritu, El Machon (Alumbres), Sierra Gorda
5335	Retamares y matorrales de genisteas	Pinares de pino carrasco / Matorrales y tomillares	El sabinar, Cabezo Negro (Calblanque), Cabezo del Pino (Portmán).
6110*	Prados calcáreos cársticos o basófilos del <i>Alyso-Sedion albi</i>	Hábitats rupícolas	Peña del Águila, Cabezo de La Galera.
6220*	Zonas subestépicas de gramíneas y anuales (<i>Thero-Brachypodietea</i>)	Pastizales perennes / Matorrales y tomillares / Pastizales perennes / Pinares de pino carrasco / Sabinas de <i>Tetraclinis</i>	Cabezo de la Fuente, Monte Miral, Cabezo de Trujillo, Cabezo de La Galera, Sancti Spiritu Sierra gorda
8210	Vegetación casmofítica calcícola del Mediterráneo occidental	Hábitats rupícolas	Cabezo de La Fuente, Pico de La Miguelota, S ^a de La Fausilla.
8230	Roquedos silíceos con vegetación pionera del <i>Sedo-Scleranthion</i> o del <i>Sedo albi-Veronicion dillenii</i>	Hábitats rupícolas	Collado de Ponce, Sancti Spiritu.

COD. HÁBITAT	DENOMINACIÓN	UNIDAD DE PAISAJE	LUGARES REPRESENTATIVOS
92D0	Galerías y matorrales ribereños termomediterráneos (<i>Nerio-tamaricetea</i> y <i>Securinegion tinctoriae</i>)	Vegetación de ramblas y fondos de barranco	Barranco del Machón, Barranco del Moro.
9340	Encinares de <i>Quercus ilex</i> y <i>Quercus rotundifolia</i>	Pinares de pino carrasco	cabezos del Horno y de la Fuente, Peña del Águila, Monte de Las Cenizas.
9570*	Bosques de <i>Tetraclinis articulata</i>	Pinares de pino carrasco / Sabinars de <i>Tetraclinis</i>	El Sabinar, Peña del Águila y Monte de Las Cenizas

Tabla 2. Hábitats de interés comunitario presentes en la Sierra Minera.

2.1.3. Especies y espacios con figuras de protección legal

La Flora vascular ha sido, junto con la fauna vertebrada, el grupo biológico para el que primero se dictaron normas legales para su conservación a escala internacional, nacional y regional. De acuerdo con el Catálogo Regional de Flora Silvestre Protegida de la Región de Murcia (Decreto 50/2003, de 30 de mayo), del total de 115 especies de la flora vascular de la Sierra Minera recogidas en el catálogo, tres están catalogadas como “en peligro de extinción”, 25 son con-

sideradas “vulnerables”, 36 están catalogadas como “de interés especial” y 50 requieren “autorización administrativa” para su recolección o explotación. En este sentido, la singularidad botánica de la Sierra Minera es excepcional, puesto que casi un 20% de las plantas catalogadas a escala regional como “en peligro de extinción”, “vulnerables” o “de interés especial”, están presentes en un área que representa tan solo el 1% del territorio de la Región de Murcia.



Figura 6. Algunas especies legalmente protegidas con sus mejores poblaciones regionales o nacionales en la Sierra Minera: *Teucrium carthaginense*, *Asplenium billotii* en una bocamina, *Cistus heterophyllus* y *Asparagus macrorrhizus*.

A escala nacional, en virtud de la Ley 42/2007 de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y la Biodiversidad se creó el Listado de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial (plantas merecedoras de una atención y protección particular). Dicha ley también estableció el Catálogo Español

de Especies Amenazadas, que incluye entre otras 137 especies catalogadas en la categoría “Vulnerable” y 208 en la categoría “En peligro de extinción”. La Sierra Minera alberga poblaciones de 5 de estas especies: 1 en situación crítica, 1 en peligro de extinción y 3 vulnerables (Tabla 3).

**CATÁLOGO REGIONAL DE FLORA SILVESTRE PROTEGIDA DE LA REGIÓN DE MURCIA
(DECRETO 50/2003, DE 30 DE MAYO)**

En peligro de extinción

Anthemis chrysantha
Cistus heterophyllus
Erica arborea

Vulnerable

Allium melananthum
Anogramma leptophylla
Asplenium billotii
Barlia robertiana
Caralluma europaea
*Carum foetidum*¹
Centaurea saxicola
Cheirolophus mansanetianus
Echinophora spinosa
*Halocnemum strobilaceum*¹
Lafuentea rotundifolia
Limonium carthaginense
Maytenus senegalensis subsp. *europaea*
Merendera filifolia
Narcissus tortifolius
Periploca angustifolia
Pteridium aquilinum
Salsola papillosa
Serapias lingua
Serapias parviflora
Succowia balearica
Tamarix boveana
Tetraclinis articulata
Teucrium carthaginense
Ziziphus lotus

De interés especial

Anabasis hispanica
Arbutus unedo
Aristolochia baetica
Asparagus maritimus
Chamaerops humilis
Cheilantes maderensis
Clematis cirrhosa
Cressa cretica
Cynomorium coccineum
*Cytinus ruber*¹
Erodium sanguis-christi
*Iris lutescens*¹
Juniperus oxycedrus subsp. *oxycedrus*
Launaea lanifera
Limonium cossonianum
Limonium insigne
Lycium intricatum
Myrtus communis
Narcissus dubius
Ophrys incubacea
Ornithogalum arabicum
Osyris lanceolata
Phillyrea angustifolia
Populus alba
Quercus rotundifolia
Ranunculus trichophyllus subsp. *trichophyllus*
Rhamnus alaternus
Rhamnus hispanorum
Sanguisorba ancistroides
Scilla autumnalis
Scilla obtusifolia
Serratula mucronata
Sideritis pusilla subsp. *carthaginensis*
Tamarix canariensis
Teucrium freynii
Ulmus minor

**LISTADO DE ESPECIES SILVESTRES EN RÉGIMEN DE PROTECCIÓN ESPECIAL Y CATÁLOGO ESPAÑOL DE ESPECIES
AMENAZADAS REAL DECRETO 139/2011, DE 4 DE FEBRERO)**

En situación crítica

Cistus heterophyllus

En peligro de extinción

Allium melananthum
Asparagus macrorrhizus

Vulnerable

Caralluma europaea
Centaurea saxicola
*Halocnemum strobilaceum*¹
Limonium carthaginense
*Narcissus tortifolius*¹
Tetraclinis articulata
Teucrium carthaginense
Erodium sanguis-christi

Tabla 3. Inventario de plantas vasculares legalmente protegidas a escala regional y/o nacional en la Sierra Minera.

¹ Táxones cuya presencia debe confirmarse

En lo que se refiere a la fauna protegida, la mayoría de anfibios, reptiles y aves presentes en la sierra están incluidos en el Listado de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial (LESRPE), en virtud del Real Decreto 139/2011, de 4 de febrero. Forman parte también del LESRPE algunos grupos de mamíferos como los murciélagos. En la **Tabla 4** se indican

aquellos taxones recogidos en el Catálogo de especies amenazadas de fauna silvestre de la Región de Murcia (Ley 7/1995, de 21 de abril, de la Fauna Silvestre, Caza y Pesca Fluvial) o aquellas que aparecen en el LESRPE con las categorías En peligro de extinción o Vulnerables del Catálogo Español de Especies Amenazadas (Real Decreto 139/2011, de 4 de febrero).

CATÁLOGO DE ESPECIES AMENAZADAS DE FAUNA SILVESTRE DE LA REGIÓN DE MURCIA (LEY 7/1995, DE 21 DE ABRIL, DE LA FAUNA SILVESTRE, CAZA Y PESCA FLUVIAL)

En peligro de extinción

*Ciconia nigra*¹
Hieraaetus fasciatus
Marmaronetta angustirostris

Vulnerables

Alcedo atthis
Bucanetes githagineus
Calonectris diomedea
Charadrius alexandrinus
*Ciconia ciconia*¹
Circus pygargus
Falco peregrinus
Gelochelidon nilotica
Glareola planticola
Hydrobates pelagicus
Ixobrychus minutus
Larus audouinii
Motacilla cinerea
Phalacrocorax aristotelis
Riparia
Tachymarpis melba
Tadorna
Tringa totanus
*Myotis capaccinii*²

De interés especial

Bubo
Bubulcus ibis
Burhinus oedipnemos
Buteo
Calandrella brachydactyla
Circus gallicus
Circus cyaneus
Galerida theklae
Hieraaetus pennatus
Himantopus
Larus genei
Larus melanocephalus
Limosa lapponica
Luscinia svecica
Melanocorypha calandra
Milvus migrans
Oenanthe leucura
Pandion haliaetus
Pernis apivorus
Philomachus pugnax
Phoenicopus ruber
Porphyrio
Sylvia undata
Meles

LISTADO DE ESPECIES SILVESTRES EN RÉGIMEN DE PROTECCIÓN ESPECIAL (LESRPE) / CATEGORÍAS EN EL CATÁLOGO ESPAÑOL DE ESPECIES AMENAZADAS (REAL DECRETO 139/2011, DE 4 DE FEBRERO)

En peligro de extinción

Pinna nobilis
Marmaronetta angustirostris
Aphanius iberus
Vulnerables
Calonectris diomedea
Caretta

Ciconia
Ciconia nigra
Circus pygargus
Falco peregrinus
Hieraaetus fasciatus
Larus audouinii
Phalacrocorax aristotelis

Tabla 4. Inventario de fauna legalmente protegidas a escala regional y/o nacional en la Sierra Minera.

¹ Escasos ejemplares migrantes cada año

² Táxones cuya presencia debe confirmarse

En lo referido a espacios naturales con figuras de protección legal, la zona cuenta con hasta 15 figuras de protección: 3 de ámbito regional, 1 nacional, 11 comunitarias y 2 internacionales (Tabla 5). Si bien, varias de ellas se solapan en gran medida sobre el terreno. Tan solo dos de estos espacios naturales protegidos se presentan íntegramente en el ámbito de la Sierra. Se trata del Parque Regional y LIC Calblanque, Monte de las Cenizas y Peña del Águila, y el Lugar de Interés Comunitario (LIC) y Zona de Especial Protección para

las Aves (ZEPA) Sierra de La Fausilla. En conjunto los dos espacios suman unas 3750 ha. de las aproximadamente 11400 ha. de Sierra. Considerando también el tramo de costa litoral de la ribera sur del Mar Menor y Mar Mediterráneo, a esta superficie se le suman otras aproximadamente 550 ha. formadas principalmente por cabezos del Paisaje protegido y Zona Especial de Conservación de los Espacios Abiertos e Islas del Mar Menor, así como humedales RAMSAR y ZEPIM, y franja litoral sumergida del Mediterráneo.

FIGURA DE PROTECCIÓN	NOMBRE	CÓDIGO ENP	HECTÁREAS
Parque Regional ¹	Calblanque, Monte de las Cenizas y Peña del Águila	ENP000005	2.472,28
Paisaje protegido	Islas e Islotes del Litoral Mediterráneo	EN0000015	39,42
Paisaje protegido	Espacios Abiertos e Islas del Mar Menor	ENP000008	1.227,25
Zonas Especiales de Conservación	Espacios Abiertos e Islas del Mar Menor	ZEC ES6200006	1.247,72
Zonas Especiales de Conservación	Islas e Islotes del Litoral Mediterráneo	ZEC ES6200007	39,49
Zonas Especiales de Conservación	Mar Menor	ZEC ES6200030	13.582,7
Zonas Especiales de Conservación	Franja Litoral sumergida de la Región de Murcia	ZEC ES6200029	13.684
Zonas Especiales de Conservación	Valles submarinos del escarpe de Mazarrón (antes Medio Marino)	ZEC ES6200048	154.081,66
Lugar de Importancia Comunitaria ¹	Sierra de la Fausilla	LIC ES6200025	869,39
Lugar de Importancia Comunitaria ¹	Calblanque, Monte de las Cenizas y Peña del Águila	LIC ES6200001	2.850,66
Zona de Especial Protección para las Aves ¹	Sierra de la Fausilla	ZEPA ES0000199	899,25
Zona de Especial Protección para las Aves	Espacio marino de Tabarca-Cabo de Palos	ZEPA ES0000508	126.067,87
Zona de Especial Protección para las Aves	Mar Menor	ZEPA ES0000260	14.550,39
Reserva marina - Aguas interiores	Cabo de Palos e Islas Hormigas	RMAI	657,20
Humedad de Importancia Internacional RAMSAR	Mar Menor	RAMSAR 33	15.414,43
Zonas Especialmente Protegidas de Importancia para el Mediterráneo	Área del Mar Menor y Zona Oriental mediterránea de la costa de la Región de Murcia	ZEPIM	27,503

Tabla 5. Espacios naturales con figuras de protección legal presentes total o parcialmente en el ámbito de la Sierra Minera.

¹ Espacios naturales protegidos presentes en su totalidad en el ámbito de la Sierra Minera.

2.1.4. El potencial biológico local para la recuperación y adaptación de ecosistemas afectados por factores de cambio global

La importancia del potencial biológico local para la recuperación de ecosistemas degradados ha pasado de tener un papel marginal hasta los años 80, a convertirse actualmente en norma técnica y legal en cualquier programa de restauración (Gann et al 2019). A este cambio de tendencia ha contribuido la suma de evidencias científicas sobre los perjuicios de la introducción de comunidades biológicas alóctonas para las comunidades autóctonas. El contexto de emergencia climática actual también ha evidenciado la necesidad de mitigar este impacto sobre los ecosistemas terrestres a partir del capital natural local, para reducir los procesos de desertificación y degradación de los ecosistemas (Navarro-Cano et al 2017; IPCC, 2023). Se trata por tanto de anticiparse a los cambios en la distribución del hábitat potencial de las especies mediante la adaptación al cambio climático, lo cual, tiene profundas implicaciones en el diseño de los programas de restauración. Por un lado, obliga a un cambio en la selección de especies de restauración, para aumentar la probabilidad de supervivencia mediante el uso de especies más resistentes al estrés abiótico. Por otro, obliga a un diseño más específico de los hábitats de plantación para cada especie. Este cambio de composición de especies también puede implicar cambios en la estructura de las comunidades a establecer. En el caso de los ambientes semiáridos como los de la Sierra Minera, el proceso de adaptación pasa por asumir la necesidad de potenciar la restauración de comunidades arbustivas, de matorral y pastizales termófilos (Martínez-Vilalta et al 2002). Asimismo, se debe reducir la extensión y densidad de las comunidades arbóreas, relegándolas a sitios menos expuestos al estrés hidrotérmico.

En la Sierra Minera, un ejemplo de esta necesidad de adaptación al cambio climático lo tenemos en el decaimiento de masas de repoblación de pino carrasco realizadas a lo largo del Siglo XX, debido a los cada vez más frecuentes eventos de sequía (Navarro-Cano et al. 2024). El reto planteado ante la necesidad de adaptación climática de la cubierta vegetal no es solo técnico, puesto que los nuevos proyectos de restauración requieren de un esfuerzo pedagógico importante, para evitar una desafección de la población local hacia una imagen objetivo de la restauración alejada del canon

tradicional. Por ello, es fundamental incorporar a la sociedad en el proceso de diseño y toma de decisiones de los proyectos de restauración (Cortina et al 2011; Gann et al 2019). Así, en ambientes semiáridos se trata de adaptar la percepción de la sociedad civil a comunidades vegetales de bajo porte y alta diversidad, en detrimento de la clásica cubierta arbórea monoespecífica y carente de sotobosque. Por otro lado, durante la última década se observa una tendencia en materia de restauración hacia el uso del papel funcional de las especies para la recuperación de la estructura de red trófica de los ecosistemas perturbados (Wainwright et al. 2018). Se trata de restablecer comunidades de alta diversidad funcional, en base a la idea de que la construcción de comunidades funcionalmente complementarias y con redundancia de rasgos resistentes al estrés puede contribuir a restaurar de manera más eficiente la funcionalidad de un ecosistema (Laughlin 2014). Los principios y estándares para la práctica de la restauración ecológica asumen esta idea (Gann et al 2019). No obstante, se desconoce en gran medida los efectos en cascada que la diversidad funcional de la vegetación produce sobre otros niveles tróficos, que frecuentemente se ignoran en los proyectos de restauración. Esta desconexión entre teoría y práctica, así como la dificultad para dar un horizonte temporal a los proyectos de restauración siguen siendo grandes retos que limitan el desarrollo de métodos generalizables a diversos tipos de ecosistemas, por lo que es necesaria la realización de experiencias piloto que sirvan para reducir la incertidumbre existente.

En ambientes semiáridos, las comunidades vegetales constituyen la plataforma biológica y la fuente de energía en torno a la cual se arman los ecosistemas y se construyen las redes tróficas. La materia orgánica aportada al suelo por las plantas requiere de su descomposición y ciclado de nutrientes para aumentar la fertilidad del suelo. Para ello es fundamental la mediación de detritívoros y descomponedores, todavía poco estudiados en el caso de la Sierra Minera. Entre las comunidades vegetales de la sierra predominan las herbáceas, que representan el 73% de las especies inventariadas. Le siguen en importancia arbustos, matorrales y pastizales perennes, que representan el 24%, mientras que solo el 3% de las especies

son árboles. Este reparto de la diversidad es indicativo del potencial colonizador de cada uno de estos grupos en la zona. Además, entre estas especies predominan las de origen mediterráneo (65%), a las que hay que sumar un 17% de plantas exclusivas del sureste ibérico o iberonorteafricanas. Es en este grupo donde encontramos decenas de especies de uso potencial en restauración bajo un criterio de adaptación al cambio climático. Se trata de los integrantes de hábitats de interés comunitario como los matorrales arborescentes de *Ziziphus* (5220*), fruticedas termófilas (5333), matorrales y tomillares termófilos, principalmente semiáridos (5334), retamares y matorrales de genisteas (5335), prados calcáreos cársticos o basófilos del *Alyso-Sedion albi* (6110*) y zonas subestépicas de gramíneas y anuales del *Thero-Brachypodietea* (6220*). A menudo estas comunidades se presentan de manera mixta, formando mosaicos ecológicos de gran importancia ecológica.

Tradicionalmente se ha obviado el potencial de estas comunidades vegetales en restauración de zonas semiáridas. Esto es debido a la creencia no justificada de que las comunidades no arbóreas tienen un escaso efecto sobre la protección física y mejora de la fertilidad del suelo. Sin embargo, durante los

últimos años la evidencia científica desmiente esa visión clásica. A partir del estudio de gradientes de colonización de 13 especies de plantas en suelos mineros abandonados de la sierra, se ha podido comprobar que varios arbustos, matorrales y gramíneas perennes colonizan estos suelos con altas concentraciones de metales pesados, alta salinidad y muy baja materia orgánica. A medida que se desarrollan, estas plantas crean parches de vegetación de alta diversidad taxonómica y funcional, facilitando bajo su copa el desarrollo de comunidades con decenas de especies menos resistentes al estrés. Tras una o dos décadas, algunas de estas especies llegan a incrementar entre 2 y 10 veces la materia orgánica y nutrientes en el suelo e incrementan significativamente la actividad de las comunidades microbianas de descomponedores (Navarro-Cano *et al.* 2018), lo que genera efectos en cascada sobre el resto de niveles tróficos.

El gran reto para poder hacer un uso efectivo de este capital natural local es el desarrollo de métodos de mínimo impacto sobre el suelo, que sean efectivos en el establecimiento de estas comunidades, para las que todavía hay poca experiencia técnica de implantación.

Bibliografía

- Alcaraz, F.J.; Barreña, J.A.; Clemente, M.; González, A.J.; López, J.; Rivera, D. y Ríos, S. (2008): Manual de interpretación de los hábitats naturales y seminaturales de la Región de Murcia. 7 vol. Murcia. Dirección General del Medio Natural. Consejería de Desarrollo Sostenible y Ordenación del Territorio.
- Colin, Y., Goberna, M., Verdú, M., & Navarro-Cano, J. A. (2019). Successional trajectories of soil bacterial communities in mine tailings: the role of plant functional traits. *Journal of environmental management*, 241, 284-292.
- Cortina, J., Amat, B., Castillo, V., Fuentes, D., Maestre, F. T., Padilla, F. M., & Rojo, L. (2011). The restoration of vegetation cover in the semi-arid Iberian southeast. *Journal of Arid Environments*, 75(12), 1377-1384.
- Egea, J.M. & X. Llimona (1982). Los líquenes silicícolas de la sierra del Cabo de Palos; estudio florístico, fitosociológico y ecológico. *Acta Botánica Malacitana*, 7: 11-38.
- De la Calle, J.A., F. Lencina, F. González & A.S. Ortiz (2000). Las mariposas de la Región de Murcia. Ed. Nausicaá. Murcia. 396 pp.
- Du Preez, G., Daneel, M., De Goede, R., Du Toit, M. J., Ferris, H., Fourie, H., ... & Schmidt, J. H. (2022). Nematode-based indices in soil ecology: Application, utility, and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*, 169, 108640.
- Esteve, M.A. et al (2013): El paisaje natural de la sierra de Cartagena-La Unión. En: Banos-González y Baños Páez (Edts) Portmán; de El Portus Magnus del Mediterráneo Occidental a la Bahía Aterrada, EDITUM, Murcia, pp. 93-138.
- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., ... & Dixon, K. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. *Restoration ecology*, 27(S1), S1-S46.
- García-Meseguer, A.J.; Esteve, M.A.; Robledano, F.; Miñano, J. (2017). Atlas y Libro Rojo de los Moluscos Continentales de la Región de Murcia. Oficina de Impulso Socioeconómico del Medio Ambiente. Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. 338 pp.
- Honrubia, M.; Zamora, M.; Gutiérrez, A.; Morte, A. 2018. Atlas de hongos de la Región de Murcia. Región de Murcia. Consejería de Empleo, Universidades, Empresa y Medio Ambiente. Oficina de Impulso Socioeconómico del Medio Ambiente (OISMA). 613 pp.

- IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- Juan-Ovejero, R., Álvarez-Rogel, J., Peñalver-Alcalá, A., Verweij, R. A., van Gestel, C. A., & González-Alcaraz, M. N. (2023). Microarthropod communities act as functional mediators of ecosystem recovery in abandoned metal (loid) mine tailings in semiarid areas. *Science of the Total Environment*, 881, 163394.
- Laughlin, D. C. (2014). Applying trait-based models to achieve functional targets for theory-driven ecological restoration. *Ecology letters*, 17(7), 771-784.
- Martín, J. A. R., Gutiérrez, C., Escuer, M., García-González, M. T., Campos-Herrera, R., & Águila, N. (2014). Effect of mine tailing on the spatial variability of soil nematodes from lead pollution in La Union (Spain). *Science of the total environment*, 473, 518-529.
- Martínez Gaviria, A. (2023). Patrones de diversidad de fauna edáfica a lo largo de gradientes de colonización vegetal en suelos mineros. Trabajo Fin de Grado. Universidad Complutense de Madrid. 30 pp. Inédito.
- Martínez Saura, C.; López Barquero, P.; Ferrández Sempere, M.; Sánchez Balibrea, J.; Ballesteros Pelegrín, G.A.; ...; Vázquez Luis, M. 2019. Atlas de Odonatos de la Región de Murcia. Ed. ANSE. 128 pp.
- Martínez-Vilalta J., Piñol J., Beven K. (2002) A hydraulic model to predict drought-induced mortality in woody plants: an application to climate change in the Mediterranean. *Ecological modelling*, 155:127-147.
- Miñano, J. y Esteve, M.A. (2012): "La importancia de los componentes ocultos de nuestra biodiversidad terrestre". En: Los espacios naturales protegidos de la Región de Murcia: estudios de casos desde una perspectiva interdisciplinar. Murcia. Editum. 109-144.
- Mittermeier, R. A., Myers, N., Mittermeier, C. G., & Robles Gil, P. (1999). Hotspots: Earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions. CEMEX, SA, Agrupación Sierra Madre, SC.
- Navarro-Cano, J.A., Goberna, M., Valiente-Banuet, A., Verdú, M. 2017. Restauración ecológica en ambientes semiáridos: recuperar las interacciones biológicas y las funciones ecosistémicas. 158 pp. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. NIPO: 059-17-057-4.
- Navarro-Cano, J.A., Verdú, M., Goberna, M. 2018. Trait-based selection of nurse plants to restore ecosystem functions in mine tailings. *Journal of Applied Ecology* 55:1195-1206.
- Navarro-Cano JA, Martos Miralles P, Escarabajal JM, Esteves Carvalhaes T. 2024. Caso práctico 6. Restauración ambiental del Cabezo Ventura (Término Municipal de Cartagena, Murcia). En: MANUAL DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA I Conocimiento, experiencias prácticas y lecciones aprendidas. Ed. Fundación Biodiversidad. 38-42. En prensa.
- Šalamún, P., Renčo, M., Kucanová, E., Brázová, T., Papajová, I., Miklisová, D., & Hanzelová, V. (2012). Nematodes as bioindicators of soil degradation due to heavy metals. *Ecotoxicology*, 21, 2319-2330.
- Sánchez-Moreno, S., & Navas, A. (2007). Nematode diversity and food web condition in heavy metal polluted soils in a river basin in southern Spain. *European Journal of Soil Biology*, 43(3), 166-179.
- Sánchez-Moya, M.C. & M.J. Cano (1999). Adiciones a la florabriófitica del Sudeste de España. La Sierra Minera de La Unión (Murcia). *Bol. Soc. Esp. Briol.*, 14: 9-12.
- Serrano, J., Lencina, J. L., y Miñano, J. (Coords.). (2021). Catálogo de los Caraboidea (Coleoptera: Cicindelidae y Carabidae) de la Región de Murcia. Editum. Ediciones de la Universidad de Murcia. <https://doi.org/10.6018/editum.2874>.
- Wainwright, C. E., Staples, T. L., Charles, L. S., Flanagan, T. C., Lai, H. R., ... & Mayfield, M. M. (2018). Links between community ecology theory and ecological restoration are on the rise. *Journal of Applied Ecology*, 55(2), 570-581.

2.2. Historia de la actividad minera en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión

AUTORES: Francisco A. Fernández Antolinos (Licenciado en Historia y Arqueólogo. Director técnico del Centro Interpretación de la Mina Las Matildes). José Ignacio Manteca Martínez (Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor honorífico del Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica. Universidad Politécnica de Cartagena). Pedro Martos Miralles (Sociólogo. Gerente Fundación Sierra Minera).

2.2.1. La minería, seña de identidad de la Sierra de Cartagena – La Unión

Una actividad minera muy intensa a lo largo de más de 20 siglos de historia es la principal seña de identidad de la Sierra de Cartagena-La Unión, hasta el punto de determinar su propia denominación como Sierra Minera. Tenemos en la Sierra Minera un claro ejemplo de paisaje cultural moldeado por los diferentes pueblos y civilizaciones que con el paso de

los siglos han dejado su impronta en la zona. Una huella que se plasma en unos parajes muy singulares, salpicados por numerosos elementos de arqueología industrial, pero que conviven con impactos medioambientales de gran calado y repercusión en el coto minero y su entorno, especialmente en el propio Mar Menor.

2.2.2. Inicios y desarrollo de la actividad minera en la edad antigua y ocaso en el medievo

El poblamiento de toda el área litoral y prelitoral del sureste peninsular, y especialmente del entorno de Cartagena, ha estado condicionado desde la antigüedad por la existencia de sus importantes yacimientos minerales. El comienzo de la actividad minero-metalúrgica en la zona se remonta al periodo calcolítico. Íberos, Tartesios, Fenicios, Cartagineses y Romanos se fueron implantando sucesivamente en la zona atraídos por su riqueza mineral. Un reciente estudio geoquímico y geocronológico de los sedimentos de la antigua laguna litoral de El Almarjal, situada junto a la ciudad de Cartagena, sitúa la primera aparición de una contaminación antrópica de plomo y otros metales hace 4.500 años (Manteca et al, 2017). Esta contaminación, en principio leve y discontinua, se hace más intensa y sostenida a partir de 3.550 años antes del presente, alcanzando su máximo en época púnica y romana.

Los primeros testimonios arqueológicos que tenemos sobre una actividad minero-metalúrgica en la Sierra de Cartagena-La Unión datan de época Ibérica y hay una constatación arqueológica en la zona de Cala Reona, más concretamente en el Cabezo del Atalayón donde se ubica un yacimiento en el que se ha encontrado en superficie material cerámico ibé-

rico fechado entre los siglos V y III a.C. (Domergue, 1987). Podría tratarse de un establecimiento comercial redistribuidor de mercancías traídas por comerciantes griegos y púnicos que intercambiarían sus productos por minerales. A este respecto, hay que destacar que es altamente probable la explotación minera de este cerro desde época prerromana, ya que prospecciones en los filones metalíferos llamados Poderoso y Diana cercanos a este yacimiento han documentado cerámicas de filiación púnica e ibérica. Otro yacimiento en el que se han encontrado hornos de fundición de minerales es el de la Loma del Escorial en Los Nietos también de época ibera.

La existencia de una explotación intensiva de las minas de plomo y plata del sureste de la Bética por parte de los cartagineses aparece documentada en un texto de Plinio que describe los yacimientos minerales de Cartago Nova y hace referencia a los pozos abiertos por Aníbal y concretamente al pozo Baebelo en el sector del Cabezo Rajao. La conquista de Cartagena en el 209 a.C por Escipión, tiene como objetivo principal, además de apoderarse de la principal base de retaguardia del ejército cartaginés, la necesidad de controlar las ricas minas de plata que sufragaban en gran parte los gastos ocasionados por la guerra contra Roma.

Las primeras referencias de las minas romanas de nuestra zona proceden del historiador griego Polibio que visitó Carthago Nova a mediados del siglo II a.C. Sus escritos se perdieron pero fueron parcialmente recogidos por Estrabón (Geografía III, 2.19). Sin duda uno de los momentos históricos más brillantes en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión tiene lugar en época republicana romana desde finales del siglo III a.C. hasta mediados del siglo I a.C. donde toda la Sierra Minera, especialmente en su vertiente sur, se va cubriendo de pequeños asentamientos estratégicamente ubicados y bien comunicados en los que la actividad predominante será la minero-metalúrgica y el control del territorio.

En los informes técnicos de los ingenieros de minas del siglo XIX y principios del XX abundan las referencias a los hallazgos de numerosas excavaciones subterráneas antiguas, a veces de enormes dimensiones, que describieron como “anchurones”, así como de estructuras y utensilios utilizados por los mineros romanos. En la cantera San Valentín, en la parte inferior de la zona de oxidación aparecieron galerías antiguas rellenas características de época romana. A su vez, durante la excavación de la cantera Emilia, aparecieron labores antiguas con ánforas, así como una bomba hidráulica de plomo, y un rodillo de piedra caliza correspondiente a una instalación de molienda de mineral (Domergue, 1987).



Figura 1. Antigua bomba de desagüe romana hallada en las labores mineras en la Cantera Emilia de La Unión.

En toda la Sierra Minera podemos encontrar evidencias arqueológicas de esta intensa actividad minero-metalúrgica. Entre los yacimientos romano-republicanos vinculados a la actividad minera podemos citar: Mina Depositaria, Mina Balsa, Braguelone, Eloísa, Feliz Anuncio, Mina Mariana, Presentación Legal, Tercera Esperanza, San Dámaso, Amistad, Segundo Ferrocarril, Miguel, Washington, San Ramón, Julia, San Francisco de Sales, San Francisco, San Eloy, Rambla de la Boltada I y II, Estrella, Mercurio, La Galera, Cabezo de la Galera, San José... La presencia de escorias romanas en algunos de ellos ha hecho que se identificaran como pequeñas fundiciones como Mina Mercurio o Estrella en la Rambla de la Boltada en Portmán. La mayoría de estos yacimientos están sólo prospectados habiéndose excavado sólo unas pocas localizaciones. Uno en los que se han realizado intervenciones arqueológicas es Mina Balsa, excavada en 1984 debido a una ampliación de la corta San José en la que se documentó la existencia de un pequeño tramo de galería romana con un posible lucernario y unas habitaciones pavimentadas con *opus signinum*, destacando la llamada habitación nº 1 cuyo pavimento de *signinum* presenta decoración geométrica con teselas cuadradas realizadas en cuarcita (Antolinos, 2008). Otro de los emplazamientos que se han podido excavar son las tres piletas revestidas con mortero hidráulico de la Rambla de la Boltada, que si bien en un principio se interpretaron como instalaciones destinadas a la fabricación de salazones o esparto en la actualidad se cree que funcionaron como lavaderos de mineral. Las recientes excavaciones en la ladera oriental del Cabezo del Pino (Portmán) a instancias de Claude Domergue por parte de investigadores de la universidad francesa de Toulouse han permitido descubrir todo un complejo industrial destinado al tratamiento del mineral. Distribuidas en una serie de terrazas escalonadas hallamos distintas estancias (algunas con muros de varios metros de alzado), piletas y canalizaciones de un gran lavadero de mineral de época romana republicana. Este yacimiento se localiza sobre un escarpe en la zona alta de esta montaña. Muy próximos a esta área de lavaderos se encontrarían los lugares en los que se obtenía el mineral, pues se observan filones de mineral (*rafas*) explotados muy posiblemente en época antigua como se deduce del numeroso material cerámico romano de sus cercanías. Junto a instalaciones minero-industriales, viviendas y almacenes, habría determinados asentamientos cuya función sería principalmente la de vigilancia y control del territorio como una posible torre vigía o fortaleza del yacimiento del Cabezo de la Galera. Sin duda, cerca de estos lugares de extracción minera también debió de haber centros ceremoniales o templos donde se venerarían las principales deidades y se les ofrecerían ofrendas,

como indica la inscripción votiva dedicada a SALAEC-VS encontrada cerca de Mina Mercurio, que posiblemente hace alusión a Neptuno o a una deidad hispana relacionada con el agua (González y Olivares, 2010).

A lo largo del s. I a.C. y en los primeros siglos de nuestra era se produjo un descenso paulatino de la extracción y tratamiento de minerales en el área. Aunque no se llegó a una paralización total de las actividades minero-metalúrgicas, estas fueron reduciendo su importancia de forma muy considerable.

Durante el Bajo Imperio y Época Visigoda apenas tenemos datos en la zona, solamente a nivel arqueológico contamos con los restos de la necrópolis tardoantigua de El Corralón en Los Belones y el hallazgo de un broche de cinturón visigodo en el Cabezo Rajao en 1887. Este hallazgo puede hacer pensar en cierta actividad minera durante este periodo, calificado tradicionalmente como de ralentización o casi paralización de las explotaciones extractivas en la Sierra de Cartagena-La Unión (Puche, 2005), aunque tal afirmación obedece en la mayoría de los casos a una falta de documentación arqueológica.

Con las sucesivas invasiones de los bárbaros en época tardorromana se inició un período de decadencia en la minería que se prolongaría durante época visigótica y musulmana. La presencia árabe en la Sierra Minera la conocemos más por las fuentes literarias que por su constatación arqueológica. Aunque las alusiones a los trabajos en las minas durante época musulmana no son muy explícitas, contamos con los textos del geógrafo andalusí Al-Udri (s. XI), el sabio persa Al-Razi (siglos IX-X) y el geógrafo Al-Istajri (s. X) que nos hablan de cierta actividad minera en la zona.

A partir de los siglos XIII-XIV se vuelve a poner en valor la riqueza minera de la península como se puede de-

ducir de algunas obras de Alfonso X el Sabio o del testimonio que nos dice que Enrique II en 1373 concedió una mina de axeb o axeve (alumbre) en Cartagena a don Juan Sánchez Manuel conde de Carrión. No cabe duda de que las Ordenanzas de 1484, 1503 y 1526, en relación con las actividades mineras, supondrán un renacimiento de éstas en la Sierra de Cartagena-La Unión durante los reinados de los Reyes Católicos y Carlos I, consolidándose esta actividad con Felipe II. Algunas de estas disposiciones reales de los siglos XV al XVII regulan las actividades mineras relacionadas con el beneficio de antiguas terreras y escoriales romanos y el laboreo del alumbre, la plata y el plomo en lugares como el Cabezo Rajao, el Sancti Spiritu o Portmán.

Los impactos medioambientales o huellas de esta actividad minera antigua, aún sin ser menores, no tuvieron la magnitud que la minería originaría en la época contemporánea. Se han documentado galerías subterráneas, rafas (filones de mineral vaciados que crean en el paisaje huecos longitudinales muy característicos en distintas zonas de la Sierra como el Cabezo del Pino en Portmán, el Cabezo de Don Juan entre La Unión y el Llano del Beal o el propio Cabezo Rajao, cuya gran rafa o raja es uno de los lugares más icónicos de la explotación minera en época antigua, especialmente en el periodo romano), escoriales, escombreras de mina o terreras que salpican todo el paisaje de la comarca minera y sus alrededores. Muchos de esos residuos de explotación minero-metalúrgica de época púnica, y, sobre todo, romana, fueron beneficiados con la intención de apurar su contenido mineral en los primeros momentos de la fiebre minera de la segunda mitad del siglo XIX y principios del siglo XX. Parece ser que buena parte de los depósitos que cubren las laderas del Cabezo Rajao y que enmascaran su litología original de rocas volcánicas (principalmente andesitas y dacitas) son capas o estratos artificiales mineros, algunos de ellos del periodo histórico romano.

2.2.3. La minería de los alumbres

El alumbre o piedra de alumbre es el nombre comercial o vulgar que se da al mineral Alunita, un mineral compuesto por sulfato aluminico y potásico, $(\text{SO}_4)_2 \text{K Al}_3(\text{OH})_6$, utilizado desde la antigüedad, al menos desde época romana, por sus múltiples propiedades y su aplicación en diversas industrias. Este mineral se forma por la acción de aguas sulfurosas sobre rocas ricas en aluminio y potasio, y se presenta en ciertas rocas ígneas en forma de vetas o en masas compactas de color blancuzco. Sus yacimientos están bastante extendidos por todo el mundo, siendo abun-

dantes en España, especialmente en las provincias de Murcia y Almería (Manteca, 2005).

Si bien la minería romana en el sureste español se basaba en el plomo y la plata, una parte de la actividad minera se dedicaba a la producción del *alum* o alumbre. Hay referencias concretas de historiadores griegos y romanos (Estrabón y Plinio) relativas a la extracción y aprovechamiento de esta sustancia, que tenía multitud de aplicaciones, para la industria textil, el curtido de pieles, medicina, incluso para la meta-

lurgia, pues según refiere Plinio, el alumbre, junto con el vinagre era un aditivo que se usaba para mejorar las propiedades del hierro (Botella y Hornos, 1868).

Tras la extracción de la piedra de alumbre en el yacimiento, se la sometía a un tratamiento consistente primero en su tostación en hornos, y después, en la lixiviación del material tostado en balsas de agua donde se producía una lejía que luego se dejaba cristalizar en otras balsas, obteniéndose así el alumbre cristalizado o puro (Botella y Hornos, 1868). En el proceso de tostación se obtenía adicionalmente la almagra. Se trata de un producto terroso compuesto de óxido de hierro, de color rojo grana, de gran interés comercial, que se empleaba en diversos usos, como la fabricación de pinturas, el calafateo de los barcos, la desinsectación del ganado, etc.



Figura 2. Mineral de alumbre (sulfato aluminico potásico).

Durante la dominación musulmana, se considera más que probable que se extrajera y se procesara el alumbre, teniendo en cuenta su interés para la industria textil, y de los curtidos, entre otras, muy importantes en la época en la zona levantina. Es además muy significativo que algunos vocablos relacionados con la industria del alumbre, como el término de “almagra”, sean de origen árabe.

Tras la reconquista de Cartagena por Alfonso X en 1245, ya se tuvo conocimiento de la existencia de yacimientos de alumbre en la zona, pero no hay noticias de su explotación hasta más de dos siglos más tarde, cuando Enrique IV concedió en 1462 una regalía al Marqués de Villena para explotar esos minerales en el

Reino de Murcia, quien luego cedería el 50% de sus derechos al adelantado Don Pedro Fajardo, nombrado posteriormente Marqués de Los Vélez, quien inició a partir de 1485 el beneficio regular de estos materiales, primero en la zona de Almazarrón, actual Mazarrón, y después en la de Cartagena (Ferrándiz, 2002).

El inicio de la industria del alumbre en Cartagena tiene lugar en 1534, cuando Carlos I otorga licencia para explotar los yacimientos de la sierra de Cartagena que están situados especialmente en el entorno del Cabezo Rajao, a Don Francisco de Los Cobos, Adelantado perpetuo de Cazorla, dándole también permiso explícito “para cortar y talar toda la leña que para ello hubiera menester”. Posteriormente, en real cédula de 8 de Enero de 1535, concede unos privilegios para explotar los yacimientos de alumbre y crear una población estable donde pudieran vivir los trabajadores de estas minas, lo que será el origen de la población de Los Alumbres Nuevos, en la actualidad Alumbres, situada unos siete kilómetros al este de Cartagena, llamados así por comparación a los yacimientos de Mazarrón que se conocían como los Alumbres Viejos (Conesa, 2002).

La producción de los Alumbres Nuevos siempre fue menos importante que la de sus homónimos de Mazarrón. Así, entre 1540-1562 en Mazarrón, la fábrica de Los Villena más la de Los Vélez, produjeron 20.000 quintales, en los Alumbre Nuevos de Cartagena, la fábrica de Los Cobos produjo sólo 6.000, y paralelamente, mientras que en esa época trabajan unos 300 hombres en la industria del alumbre de Mazarrón, en la de los Alumbres de Cartagena, lo hicieron unos 100 solamente (Guillén, 1997).

La actividad del alumbre y la almagra coexistieron en ciertas épocas de los siglos XVI y XVII con una cierta actividad de minería metálica, que se basaba mayormente en la “rebusca” o estrío de las antiguas escombreras de mina dejadas por los romanos con apreciable contenido en plomo y plata. Así en 1569 ya se autoriza el registro de “ciertos terrenos escoriales” en la zona del Sancti Spíritu (Sierra de Cartagena).

En el siglo XVIII continuó la actividad de las fábricas de almagra, tanto en Mazarrón como en Cartagena, destinándose la mayor parte de la producción a los arsenales militares y a la real fábrica de tabacos de Sevilla. Mientras que en Cartagena la producción de almagra cesó definitivamente a finales del siglo XVIII, en Mazarrón continuó durante todo el siglo XIX, llegando incluso a darse cierta producción en la primera mitad del XX.

Aunque la actividad minera basada en el alumbre en la Sierra de Cartagena-La Unión fue algo más mo-

desta que la que se produjo en la zona mazarronera, tuvo su repercusión en la creación de una nueva localidad, Alumbres, y toda una serie de explotaciones de Alunita centradas en su gran mayoría en torno al Cabezo Rajao y entorno. Asimismo, fueron surgiendo fábricas de alumbre y almagra que en la actualidad están prácticamente desaparecidas, pero que en su momento originaron sus correspon-

dientes huellas en el paisaje e impactos medioambientales que serían en todo caso limitados. Aun así, al inicio de la edad moderna, en los siglos XVI y XVII especialmente, la minería del alumbre contribuyó a agrandar la rafa del Cabezo Rajao y restos de residuos de esta explotación es más que probable que formen parte de esas capas que cubren las laderas de este relieve volcánico.

2.2.4. El resurgir de la minería y metalurgia en el siglo XIX e inicios del XX

El boom de la minería en el siglo XIX

Después de siglos de casi total abandono de la actividad minera, a partir de 1839 se produce en la Región de Murcia, y especialmente en los antiguos distritos de Cartagena y Mazarrón, un fulgurante relanzamiento de la investigación y explotación de los recursos minerales, con especial interés en el beneficio del plomo y de la plata. La minería murciana moderna es ligera-

mente posterior al desarrollo de la minería del plomo en las vecinas cuencas almerienses. Fue especialmente el descubrimiento del rico filón Jaroso, en la almeriense Sierra de Almagrera, en 1839, lo que sirvió de acicate para el despegue de la minería murciana. Ese mismo año el general Requena comienza las labores de explotación en el Cabezo Rajao, aprovechando inicialmente las abundantes terreras y escoriales romanos que recubrían las laderas de ese cerro.



Figura 3. El Cabezo Rajao de La Unión a finales del siglo XIX.

A partir de 1842, el desarrollo de la minería se va a caracterizar por un intenso laboreo que se reflejará en la multiplicación de pequeñas instalaciones mineras diseminadas por todos los rincones de la Sierra.

En primer lugar, se aprovecharon los recursos que se podían extraer con mayor facilidad: los escoriales y terreras antiguas procedentes de la minería romana, que aún contenían una importante cierta ley en plomo. Como referencia a la enorme abundancia de estos residuos mineros, Botella y Hornos (1868), estimó en más de 1 millón de toneladas la cantidad de terreras romanas o *escoriales* sólo en el área de Mazarrón. También se explotaron las masas de óxidos superficiales o “monteras” también conocidos como “carbonatos” para el beneficio de los carbonatos de plomo y de cinc, así como para el aprovechamiento del hierro.

Junto al desarrollo minero se produce el nacimiento de una importante industria metalúrgica, que inicialmente se dedicó al beneficio de las escorias romanas y materias primas de la Sierra Almagrera y Mazarrón para ser fundidas en Cartagena, donde se levantaron fábricas con este exclusivo objeto a raíz de que el Gobierno prohibiese en 1840 la exportación de argentíferos. Fue, pues, el abastecimiento de estos establecimientos el que incentivó los trabajos del subsuelo.

Otro de los factores que hizo viable el renaciente recurso fue la demanda exterior. España, con su retraso secular, no podrá absorber todavía la producción local. Igualmente, hay que reconocer que sin las ventajosas condiciones geográficas este impulso no hubiera podido ser completo. Los minerales a la orilla del mar, y un puerto seguro y espacioso que facilita-

ba mucho la contratación minera y la importación de carbones en gran escala.

A partir de la década de 1850 se desarrollan más las explotaciones subterráneas y comienzan a beneficiarse los minerales en forma de sulfuros, que aparecen por debajo de las zonas de oxidación, normalmente a profundidades por debajo de los 30 o 40 metros. La primera época de apogeo minero, del Pb y la Ag, se sitúa entre 1840 y 1874. Una segunda época de auge se sitúa aproximadamente entre 1880 y 1900.

La minería del hierro comienza un poco más tarde que la del plomo, concretamente a partir de 1856, y tendrá su auge entre 1874 y 1902. Aunque las menas de hierro de la región eran más pobres que las del norte (Vizcaya), el problema de las guerras carlistas paraliza la minería vasca y de rebote impulsa la de Murcia. Con la primera guerra mundial le llega el fin a la minería del Fe en gran parte de la región.

El impacto del resurgir minero fue inmediato. El área se convirtió en un importante foco de atracción laboral, originándose un extraordinario crecimiento demográfico. Correlato de aquella realidad será el surgimiento de extensos caseríos en toda la falda norte de la sierra: El Llano, El Estrecho, San Ginés, Los Blancos, El Algar y El Beal. Constituyéndose en 1860 un nuevo municipio con los pueblos de El Garbanzal, Herrerías, Roche y Portmán. Ocho años más tarde y para resolver una rivalidad surgida entre ellos, Prim -llegado a Cartagena con motivo de la Revolución de septiembre- propondrá el nombre de La Unión para el municipio recién creado.

Los efectos multiplicadores no terminaron ahí, surgiendo una apreciable secuencia inversora. Desde talleres donde se reparaban los artilugios empleados -mesas de concentración, máquinas de vapor, etc.- a pequeñas manufacturas de "pólvora y mecha", sin olvidar el arraigo de una potente industria química, cuya primera referencia se sitúa en 1896, con la inauguración de una factoría en El Hondón.

La espectacular eclosión que comentamos precisó asimismo de la articulación de una red viaria: camino de arrecife desde Santa Lucía a Herrerías (1855), ferrocarril de Cartagena a La Unión (1874) y acondicionamiento de los fondeaderos (Cartagena, Escombreras y Portmán).

Con todo, una serie de limitaciones impidieron la consolidación. La más grave de todas guardará relación con la escasa capitalización. Variable que paulatinamente se agravó ante el progresivo envejecimiento de las leyes metálicas, verdadero talón de Aquiles de la actividad. Sendos condicionantes se tradujeron en un aprove-

chamiento irracional abocado a la ley de rendimientos decrecientes. Una economía que, calificada sin reservas de depredadora, tuvo su origen en la parquedad de las concesiones consagrada por la ordenanza de 1825. Todo ello dio lugar a una minería especial y característica, en la que, dado el fácil laboreo inicial, con caudales insuficientes, ingenios rudimentarios y casi sin tareas preparatorias comenzaba enseguida el reparto de utilidades. El reverso de tan ominoso arbitrio estuvo representado por una dinámica lastrada no sólo por la configuración de las reservas, sino por el abandono tecnológico. Cabe apuntar, en este sentido, la corta reinversión de los beneficios obtenidos, casi siempre drenados hacia consumos suntuarios, particularmente moradas de lujo.

La consecuencia más condenable de este proceso será la ausencia tanto de una industria siderúrgica como la demora en el tratamiento de los cincíferos, que fueron a menudo malvendidos. El mismo origen reconocerá la continuada penetración de fondos foráneos, especialmente en el subsector metalúrgico.

El minifundismo extractivo dará a la demarcación minera un carácter especulativo y hará que la forma de extracción predominante sea indirecta con el arrendamiento de las minas. Surgirá así la figura del "partido" y con ella terminará de hipotecarse el porvenir. Los "partidarios" que sólo atendían a extraer la mayor cantidad de mineral en el menor tiempo posible llevaron el expolio a extremos inauditos. La codicia era la única guía. Los escombros, inundaciones, hundimientos, intrusiones, relegación de investigaciones y de gastos en seguridad, fueron las principales secuelas.

A este adverso cuadro se añadirá la dependencia mercantil con respecto al exterior, lo que hizo aún más vulnerable el negocio. Dada su estructura, la más pequeña depreciación ocasionará un sin número de crisis cíclicas.

Una industria sostenida de forma tan precaria acabó saldándose con una sobreexplotación de la mano de obra. El casi absoluto ahorro de medios impondrá el olvido de las imprescindibles normas de prevención lo que no tardaría en reflejarse en un elevado número de accidentes. A tan deplorable situación cabe sumar la ausencia de un centro hospitalario que, demandado desde 1856, no alcanzaría carta de naturaleza hasta 1878 con el Hospital de Caridad de La Unión.

Esta misma situación general argumentará la necesidad del empleo sistemático de las llamadas "fuerzas medias". Por niños de corta edad (de 8 a 12 años) estará constituido el 50 por ciento del censo laboral de la sierra hacia 1865. Aunque el porcentaje descendió en los años siguientes nunca llegó a desaparecer por completo. Por

ende, aquellos indefensos impúberes se encontraron controlados por un llamado "capataz de correa", que imponía a los rezagados duros castigos corporales.

En este contexto, no es extraño subrayar las extremas condiciones de trabajo: desde los pésimos accesos a los tajos que suponían largos desplazamientos, a jornadas "de sol a sol" y en muchos casos con el agua hasta la cintura. Y todo para obtener unos míseros ingresos que apenas alcanzaban a cubrir los mínimos vitales, y que con frecuencia se veían recortados por los pagos en especie (los tristemente famosos "vales"), de que se beneficiaba directamente la patronal.

Contra el cercado levantado por una estructura tan precaria e irracional, se estrelló la legislación del momento. Trabajo de los niños, reglamentaciones de horarios, contingencias, descanso dominical..., no pudieron aplicarse en donde todo se mantenía por equilibrios inverosímiles.

Con semejante situación no es de extrañar el nacimiento de una poderosa conciencia de clase, que daría cuerpo y vida a un proletariado organizado, y a la construcción de la Casa del Pueblo del Llano del Beal en 1916, una de las más antiguas del país. Su historia quedó entrelazada en una densa trama represiva, como demuestran los resultados de las huelgas de 4 de mayo de 1898 (3 muertos y numerosos heridos) y de 7 de marzo de 1916 (8 muertos y 16 heridos).



Figura 4. Fundición Dos Hermanos de Pío Wandosell en 1929. En ella tuvieron lugar los trágicos sucesos de la huelga general de 1916 donde murieron 8 mineros por la actuación del ejército y la guardia civil.

Como ya se ha indicado, a pesar de que esta actividad extractiva fue siempre muy irregular e inestable, y ampliamente sometida a las fluctuaciones de los mercados internacionales, el distrito de La Unión junto con el de

Mazarrón a finales del siglo XIX se posicionó entre los mayores productores mundiales de plomo. La época de auge aún persistirá durante los comienzos del siglo XX.

Declive de la minería en la primera mitad del siglo XX

En los años 20, el sector entró en franca regresión, dando lugar al cierre de una gran cantidad de minados y a una aguda sangría poblacional, perceptible en la pérdida de efectivos del municipio de La Unión, equivalente a casi un 60% de su población entre 1920 y 1930, pasando de algo más de 30.000 habitantes en 1920 a poco más de 12.000 en 1930. Si las causas aparentes se podían encontrar en la depreciación y el cierre mercantil ocasionado por la Primera Guerra Mundial, en el fondo existía otra serie de circunstancias, sobre todo que la descapitalización reinante había impedido la inaplazable renovación tecnológica, cuando los yacimientos eran ya del tipo GBP (Galena-Blenda-Pirita).

Se asistió entonces a la puesta en práctica de medidas interventoras para sostener las extracciones, como la creación del Sindicato Minero de Cartagena-Mazarrón, impulsado desde 1927 por el Gobierno de España, que estableció unos fondos para financiar a los mineros de este sindicato con el que se intentó rescatar al sector minero de la crisis de precios, permitiéndoles desarrollar sus medios de extracción y el tratamiento de los minerales en fundiciones cooperativas. O la creación en 1928 del Consorcio del Plomo, que proponía la gestión mancomunada de minas y fundiciones, estableciendo así precios suficientemente altos para evitar pérdidas. En 1931, no obstante, el Consorcio se fue quedando sin fondos para las minas de la zona, lo que creó un incierto futuro para las fundiciones que fueron progresivamente cerrando en los años venideros.

A pesar de estos intentos de mantener el sector, que sólo consiguieron ralentizar por un tiempo el cierre de minas, la agonía de la minería tradicional fue inevitable con el cierre progresivo desde los años 30 de las distintas fundiciones de la Sierra Minera: la última fundición en cerrar en La Unión fue la de Sta. Brígida (también conocida como El Humo) en 1932, y en 1935 se cerró la fundición Concepción de Portmán, para concentrar todas las menas disponibles en la de Santa Lucía de Cartagena. Fue una época de gran depresión económica que provocó una sangría poblacional por la emigración masiva de los mineros. Esta situación de crisis general en el negocio minero, ya muy evidente desde el fin de la Primera Guerra Mundial, se agudizó en los años 20 y empeoró con el hundimiento de los precios y de la demanda que se produjo tras la gran depresión de 1929.

El primer ayuntamiento unionense de la Segunda República se constituyó el 21 de abril de 1931, y una de las primeras gestiones del consistorio fue atender a las consecuencias del ocaso progresivo de la minería que había provocado secuelas como paro, emigración y derribo de edificios abandonados en el municipio. Así, el primer alcalde socialista de La Unión, Juan Sánchez Blaya, comenzó a realizar gestiones con el Gobernador Civil para conseguir urgentemente la construcción de varios caminos vecinales para aliviar el desempleo. Uno de estos caminos fue el llamado "de la Cuesta de las Lajas" conocido como "camino vecinal número 33". Ya desde el auge de la minería del siglo XIX se señaló la gran importancia de las vías de comunicación en la Sierra minera para dar una mayor fluidez en la circulación de hombres, caballerías y vehículos y el transporte de los minerales extraídos. Tras algunos intentos de modernizar el trayecto de la antigua senda de la rambla de las Lajas que no tuvieron una concreción real, fue en esta coyuntura de crisis económica cuando se pudo realizar el llamado "Camino del 33" que comunicaba la parte norte de la Sierra, las minas de La Unión, con la bahía de Portmán. La necesidad de la construcción de esta infraestructura trascendió el sentido utilitario de obra pública para convertirse

en un símbolo de resistencia de un pueblo contra la miseria, el paro y el hambre. Con un presupuesto en torno a las 800.000 pesetas, la utilidad del Camino del 33 o Carretera del 33 fue siempre discutida puesto que esta vía no tuvo edad dorada, ya que, aunque había sido demandada por un largo tiempo, cuando se hizo realidad, el momento de esplendor de la minería unionense ya había pasado y no llegó a tiempo para mejorar las condiciones de la actividad minera y frenar la crisis galopante del sector. Eso sí, su construcción dio trabajo y salario por un tiempo a más de 100 familias de la localidad.

Con este horizonte llegaron los años de la Guerra Civil, en la que el gobierno republicano incita a reabrir minas y fundiciones. Ante el escaso entusiasmo de los empresarios, los sindicatos toman el control de algunas concesiones mineras y de las pocas fábricas metalúrgicas operativas. Hacia 1937 las experiencias colectivizadas en la sierra se extienden montándose cooperativas obreras en activos industriales y mineros abandonados como ocurrió en la Maquinista de Levante o en algunas minas aisladas como La Ocasión. Contra todo lo previsto, el balance no resultó negativo ya que se asistió a una tímida recuperación de la actividad minera.



Figura 5. Obreros de un lavadero en 1940.

Durante el primer franquismo, las circunstancias alumbradas por la política autárquica de la dictadura permitieron la reapertura de criaderos hasta ese momento marginales. Pero la actividad no consiguió salir de una apatía casi total. La actividad minera languidece

en la zona hasta volver a reactivarse con pujanza a partir de los años 40, con el desarrollo de las técnicas mineralúrgicas (concentración de sulfuros por flotación diferencial) y posteriormente con la minería mecanizada "a cielo abierto".

Las huellas en el territorio del boom de la minería subterránea

Es toda esta etapa de la minería en la SM de Cartagena-La Unión en época contemporánea, la que nos ha legado un mayor número de restos arqueológico-industriales abandonados que conforman un rico patrimonio minero y un paisaje cultural. Pero también nos ha dejado un territorio afectado por la actividad minera subterránea. Este impacto medioambiental fue importante ya que la Sierra Minera no era un lugar muy salubre en esos momentos, desde la segunda mitad del siglo XIX hasta la primera mitad del siglo XX. La contaminación atmosférica era intensa por la existencia de gran cantidad de instalaciones mineras que funcionaban con maquinaria a vapor, con sus consiguientes salas de calderas y chimeneas de expulsión de humos, además de hornos de tostación o calcinación de minerales y los gases de las fábricas de fundición y de otras empresas auxiliares de fabricación de maquinaria, herramientas o pólvora. La deforestación, la contaminación del terreno y de las aguas con aportes de residuos mineros sólidos y líquidos (lodos) y su afección a la flora y fauna del entorno ya supone un impacto considerable en el paisaje de la zona.

Entre las huellas en el territorio que ha dejado esta etapa de minería subterránea hay que destacar la gran cantidad de pozos mineros de acceso a las labores. En la Sierra Minera, están inventariados más de 3.000 pozos mineros, que constituyen por sí mismos un riesgo, ya que todavía hoy en día son muchos los pozos desprovistos de brocal o que este es de

muy baja altura, lo que compromete la seguridad de las personas que circulan por sus proximidades. Muchos de estos pozos poseen en sus inmediaciones escombreras y terreras de pequeñas dimensiones y escasa altura fruto de la propia perforación del pozo y las diferentes galerías interiores. Generalmente este tipo de residuos son inertes, ya que están formados por tierras y rocas con muy poca cantidad de material potencialmente contaminante.

Otra situación diferente es la de los depósitos con gangas de los distintos lavaderos gravimétricos, menos peligrosos que los pantanos de finos de los lavaderos de flotación diferencial posteriores, pero que sí pueden generar algunos problemas, sobre todo de contaminación hídrica.

Hay que subrayar que hasta bien entrado el siglo XX se permitía arrojar los residuos del tratamiento y concentración de los minerales directamente a las ramblas con la consiguiente contaminación de suelos y afección en los mares en las que desembocaban.

Otros depósitos que también son muy abundantes en este periodo de la minería subterránea son los escoriales o gacheros (residuos o desechos de fundición) esparcidos por toda la Sierra Minera.

Aunque ciertamente, el gran cataclismo ambiental en la zona tuvo lugar por el cambio en los métodos de extracción con las enormes explotaciones mineras a roza abierta y la implantación de los lavaderos de concentración del mineral con nuevos sistemas de flotación diferencial a partir de los años de 1940-50.

2.2.5. Nuevo apogeo minero en la segunda mitad del siglo XX: la minería a cielo abierto

Introducción y expansión de la Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya en Cartagena

La Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya se constituyó en París, en 1881, por iniciativa del ingeniero de minas francés Charles Ledoux, con la participación mayoritaria de la banca Rothschild. Ledoux era un destacado directivo de la empresa Société Houillère et Metallurgique de Belmez, explotadora de minas de carbón y de plomo en el Sector de Sierra Morena, que se había constituido en 1865, y que

se puede considerar como el precedente de Peñarroya. La actividad minera y metalúrgica de esta nueva compañía se centró inicialmente en las provincias de Córdoba, Jaén y Ciudad Real.

Su interés por el distrito de Cartagena llegaría bastantes años después, a partir de transacciones comerciales con la familia Figueroa y con el empresario francés Hilarion Roux, que disponían de importantes activos en dicho distrito. Así en 1912 Hilarion Roux cede a Peñarroya los derechos de la Compañía francesa de minas y fábricas de Escombreras-Bleyberg, entre ellos una fundición

de plomo en Escombreras. En 1913 los Figueroa traspasan a Peñarroya sus activos minero-metalúrgicos, entre ellos la fundición San Ignacio en Santa Lucía (Cartagena). Con dichas transacciones la empresa Peñarroya adquiere además de esas dos fundiciones un importante lote de concesiones mineras tanto en la Sierra Minera como en Mazarrón, con lo que los activos de esta sociedad en la provincia de Murcia tomaron una importancia muy considerable.

Pero la introducción más efectiva de la empresa francesa en la Sierra Minera tuvo lugar en 1930 al asociarse con la Mancomunidad Miguel Zapata e hijos fundada por el legendario Miguel Zapata, también conocido como *El Tío Lobo*, que estaba fuertemente implantada en la zona con numerosas minas en actividad, además de la fundición La Orcelitana en Portmán y los talleres mecánicos de La Maquinista de Levante en La Unión. Con esta asociación de las dos empresas al cincuenta por ciento, se constituyó el 15 de septiembre de dicho año la Sociedad Minero-Metalúrgica Zapata Portmán, con un capital social de 26 millones de pesetas (SMMP SA, 1984, Manteca et al, 2005), cuya dirección técnica sería asumida por el ingeniero francés Robert Merlín.

El citado ingeniero, ante las sucesivas crisis mineras, comenzó a estudiar la posibilidad de un cambio radical en el modelo de explotación minera, sustituyendo la minería subterránea por la minería a cielo abierto y pasando del minifundismo minero a la creación de grandes cotos mineros. Ese estudio se llevó a cabo entre 1931 y 1935 y finalmente se estableció un primer *Proyecto de explotación a cielo abierto de la Cantera Emilia*, proyecto que se hubo de aplazar al sobrevenir la Guerra Civil Española.

Tras la guerra civil se desencadenó la Segunda Guerra Mundial, lo que continuó paralizando el gran proyecto de la Cantera Emilia propuesto por Roberto Merlín. A lo largo de este periodo bélico diversas empresas se interesaron por participar en el proyecto, entre ellas la llamada Minas del Sur, perteneciente a un grupo alemán, que en el marco de la colaboración entre los gobiernos de Hitler y de Franco, envió una misión técnica a Cartagena para estudiar *in situ* el proyecto (SMMPE, SA, 1984).

En 1940 la Sociedad Minero Metalúrgica Zapata-Portmán reabrió la mina El Concilio, e inauguró el lavadero Regente, lavadero que fue el primero de la sierra en aplicar la técnica de flotación dife-

rencial que tanto contribuyó a relanzar la minería del distrito.

Posteriormente, en 1944, Zapata-Portmán puso en marcha otro lavadero de flotación, el lavadero de Coto Azul, en la ladera norte del Sancti Spíritus, cerca de Emilia, a modo de planta piloto, orientada a conocer experimentalmente el resultado de esta técnica con el complejo mineral del manto de silicatos propio de este sector de la Sierra (también llamado manto de los azules y de ahí el nombre del lavadero). Los resultados fueron satisfactorios y animaron a la empresa a seguir con el nuevo proyecto desarrollando un nuevo lavadero a mayor escala, lo que más tarde sería el lavadero Roberto. El lavadero de Coto Azul estuvo funcionando hasta 1957, cuando fue relevado por el lavadero Roberto construido en Portmán sobre el solar de la fundición Orcelitana.

En 1945 se retomaron los estudios para explotar a cielo abierto *el manto de los silicatos* del sector de Emilia; y se realizaron las gestiones de compra o arrendamiento con los diversos propietarios de concesiones mineras y terrenos que eran necesarios para desarrollar las futuras operaciones mineras. La trascendencia del *Proyecto de Silicatos* y su importancia tecnológica y económica inclinaron a Peñarroya a llevar en exclusiva las riendas de esta etapa. Por ello en 1946 la empresa francesa compró su parte a la familia Maestre-Zapata, obteniendo el control total de la Sociedad Minero-Metalúrgica Zapata Portmán.

En el año 1953 se comienza el desmonte de la cantera Emilia; al principio con una maquinaria un tanto precaria, pero que poco a poco va siendo sustituida por equipos más modernos y eficientes para el arranque, carga y transporte del material rocoso. Paralelamente se acomete otra gran obra de ingeniería, el túnel José Maestre. Un gran túnel de 2.600 metros de longitud que permitiría el transporte del mineral por ferrocarril subterráneo, desde el pozo-tolva Carlos, en la cantera Emilia, hasta las instalaciones del lavadero Roberto en Portmán (SMMPE, SA, 1970). Por fin, en 1957, terminadas las instalaciones del lavadero y del ferrocarril, el mineral de la cantera Emilia comienza a alimentar regularmente al lavadero, dando comienzo a una nueva etapa de la minería de la Sierra, basada en la innovación tecnológica, que sería con mucho la más importante de toda su historia. Inicialmente, el ritmo de tratamiento del lavadero era del orden de 1.000 toneladas día. Esta capacidad fue aumentando a lo largo de sucesivas ampliaciones hasta llegar a finales de la década de 1980 a casi 10.000 toneladas día.



Figura 6. Cantera Emilia: voladuras.

Al inaugurarse estas modernas instalaciones por parte de la antigua Sociedad Minero Metalúrgica Zapata Portmán, que ya era íntegramente Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya, hubo un cierto reparto de honores entre las dos antiguas partes de la sociedad: al nuevo lavadero se le bautizó como Lavadero Roberto, en homenaje al ingeniero francés Roberto Merlín, mientras que el gran túnel se bautizó como Túnel José Maestre, en homenaje al yerno del legendario Miguel Zapata.

En 1968 se constituyó la filial española de la Peñarroya. Se creó así la Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya-España, con sede en Madrid, y con una organización autónoma, siendo nombrado director general el ingeniero José González Carvajal. Del director general dependían los diversos servicios regionales. Mientras que la dirección de las instalaciones mineras de Peñarroya en la Sierra de Cartagena, conocidas como *Servicio de Silicatos*, quedó a cargo del ingeniero Víctor Alvargonzález Juliana, que lideró la política de expansión de la empresa.

El sistema de explotación minera a cielo abierto supuso un importante éxito económico ya que los costes por tonelada de mineral extraído se redujeron hasta una cuarta parte de los costes por explotación subterránea. Sin embargo, debido a las bajas leyes del mineral, con valores entorno al 1,5% de plomo y al 1% de cinc, el margen de beneficio por tonelada era

muy reducido, por lo que muy pronto la empresa se lanzó a sucesivos incrementos de producción pasando de apenas 1.000 toneladas día en 1960 a 5.000 en 1967, 7.000 en 1972 y 8.000 en 1978.

Tras la exitosa implantación de la minería a cielo abierto en la Sierra, frente a la cada vez más deficitaria minería subterránea que practicaban las demás empresas, Peñarroya se lanzó a una intensa campaña de negociaciones para adquirir terrenos y concesiones mineras pertenecientes a las diversas empresas, como Francisco Celadrán, Asturiana de Minas, Eloy Celadrán, Española del Cinc, y otras, todas ellas en grave situación económica y en fase de cierre. Las negociaciones con Minera Francisco Celadrán, que había sido la principal productora a principios de los 50, fueron especialmente importantes, permitiendo que Peñarroya llegara a ser el principal titular de las concesiones mineras de la sierra y se convirtiera en la empresa hegemónica a partir de los años 70.

Paralelamente a las negociaciones, se llevaron a cabo importantes campañas de investigación geológica mediante sondeos, lo que permitió descubrir y valorar nuevas reservas minerales y llevó a la apertura de hasta 8 canteras además de la Emilia: Cantera Gloria, Cantera San Valentín, Cantera Los Blancos I y Los Blancos II, Cantera Gloria Este-San José, Cantera Tomasa, Cantera Brunita y la última

de ellas, en 1984, la Cantera Sultana-Los Blancos III. Para ilustrar la importancia de la labor de la investigación geológica realizada por Peñarroya en la Sierra señalamos que desde 1967 a 1980 se perforaron 4.360 sondeos a rotación con recuperación de testigo continuo, y con una profundidad media de unos 115 metros.

En 1983, ante la disminución de rentabilidad de la empresa, se acometió una importante modificación en el procesado del mineral: se instaló, al sur de la cantera San Valentín y próximo a la instalación de trituración primaria, un gran molino semiautógeno (MSA) de 6 metros de diámetro y una capacidad de tratamiento de 500 toneladas hora. El mineral salía del molino reducido a pulpa que se impulsaba hasta el lavadero a través de una tubería-mineroducto de 2,2 km de longitud. Con esta remodelación quedó en desuso el complejo sistema de transporte de mineral por ferrocarril así como la nave de trituración secundaria, permitiendo además un aumento de producción y una reducción de personal y de los costes.

A pesar de todo ello, el crecimiento empezará a verse detenido al final de los años 80, al hilo de la declinante coyuntura económica internacional y de los graves problemas sociales y medioambientales sobrevenidos.

El impacto medioambiental

La minería a cielo abierto transformó profundamente el paisaje dejando un territorio “herido” por el gran impacto ambiental que supuso. En España, la primera normativa medioambiental sobre minería es la Ley de Minas de 1973, ley que no se desarrolla plenamente hasta el Real decreto 2994 de 1982, donde ya aparece la figura del “Plan de restauración del espacio natural”. Para esa fecha la alteración del paisaje ya había sido muy profunda. Dado que Peñarroya había ido comprando la mayoría de las minas de la Sierra, se hizo de esta forma con los activos y pasivos (incluidos los ambientales) de las pequeñas e incontroladas empresas mineras, incluidos los depósitos de lodos mineros de lavado (balsas de estériles) sin ningún tipo de acondicionamiento ambiental. Pero el problema más grave de la minería a cielo abierto lo constituyó el aterramiento de la Bahía de Portmán y su entorno por más de 33 millones de m³ (más de 60 millones de Tm) de estériles mineros vertidos al mar desde el lavadero Roberto, con la autorización de la administración pública en 1959. La concesión administrativa siguió vigente hasta 1999.

Además del desastre ambiental de Portmán, tras la paralización de la actividad minera en el año 1991, la Sierra Minera quedó con un paisaje profundamente transformado por la mano del hombre, con parajes con un aspecto casi “lunar” y con problemas graves de contaminación por los estériles mineros con elevadas concentraciones de metales. En su conjunto, los residuos mineros acumulados en un total de 2.351 depósitos y estructuras mineras, ocupan una superficie de 8,83 km² y 199,30 millones de m³ (García, 2005).



Figura 7. Paisaje lunar del entorno del Llano del Beal y del Estrecho de San Ginés provocado por la minería a cielo abierto.

Los impactos ambientales negativos más destacados de la actividad minera en este territorio son:

- Terreras y escombreras: Aparte de las pequeñas escombreras y terreras de los antiguos pozos y depósitos de lavaderos gravimétricos, en la comarca minera se pueden observar las grandes escombreras de los estériles de corta que sí tienen altura elevada, alguna con más de 30 metros. Son especialmente importantes en toda la zona central de la Sierra, en torno al Monte Sancti Spiritu.
- Grandes balsas de estériles: Las balsas de flotación proceden de los lavaderos de flotación diferencial del último ciclo de la minería. En total hay 89 balsas de este tipo, que ocupan 2,18 km² y un volumen global de 22,89 Mm³. Después de más de 30 años de inactividad, no presentan grandes problemas de estabilidad, aunque en 1972 sí se produjo un accidente de características similares al de Aznalcóllar al romperse una de estas balsas junto al cementerio de La Unión, con una víctima mortal y una gran extensión sepultada

por los estériles mineros. El principal problema de estos residuos es su elevada toxicidad por su contenido en metales, sobre todo de plomo y zinc, que impide que se recupere en ellos una cubierta vegetal, y que representan un riesgo para la salud ambiental por la dispersión de contaminantes por la acción del viento y la lluvia, al existir un porcentaje cuya granulometría es inferior a 10 micras, lo que hace que su aspiración puede ocasionar problemas respiratorios, sobre todo en aquellas personas que tengan trastornos pulmonares.

- Suelos contaminados y arrastres en ramblas hasta el mar: la gran cantidad de suelos con residuos mineros contaminados con metales

pesados favorece que las escorrentías por la lluvia arrastren sedimentos contaminados a través de las ramblas que desembocan al Mar Mediterráneo y al Mar Menor, siendo uno de los problemas más importantes de contaminación de este último.

Pero esta última fase de la actividad minera a roza abierta también dejó elementos patrimoniales como las grandes cortas mineras a cielo abierto, lavaderos de concentración del mineral por flotación diferencial, maquinaria minera como los restos de vagones y locomotoras del antiguo tren minero existente junto al túnel José Maestre, o las grandes máquinas excavadoras eléctricas de cables.

2.2.6. El cierre de la minería y la crisis de la comarca en los años 90 del siglo XX

Pérdida de rentabilidad de la minería

Las cotizaciones de los metales particularmente plomo, cinc y plata, determinadas por la bolsa de metales de Londres, London Metal Exchange, experimentaron en la década de los 80 una importante caída, al tiempo que los costes, especialmente los salariales, presentaron una rápida y continua subida, con un IPC medio anual entorno al 5%. Además, la paridad del dólar respecto a la peseta influyó de manera muy importante, al fijarse la cotización de los metales en dólares. La depreciación del dólar frente a la peseta, a partir de 1985, perjudicó seriamente la economía de la empresa. El margen económico por tonelada de mineral bruto producido en 1987 es de apenas 100 pesetas, es decir del orden de 1 dólar USA, eso sin tener en cuenta la amortización de inversiones.

La oposición social a la cantera de los Blancos III

Tras el agotamiento progresivo de las antiguas cortas en explotación, la compañía Peñarroya comenzó a desarrollar, a partir de 1984, una nueva explotación minera a cielo abierto, denominada Los Blancos III, o Sultana, que constituía la última masa importante de reservas existentes en la Sierra, y que permitiría poder mantener la producción de mineral por un período de unos 15 años, según estima-

ciones de la empresa. Pero el mantenimiento de la actividad minera tenía un alto coste social ya que este yacimiento se encontraba en las proximidades del pueblo minero de El Llano del Beal; de hecho, una parte del yacimiento está bajo el poblado. Frente a los planes de Peñarroya, los vecinos del pueblo (unos 1.500 habitantes) se movilizaron ya que consideraron que perjudicaba seriamente no sólo su calidad de vida sino la misma existencia de su localidad y sus hogares.

Inicialmente, la empresa carecía de Proyecto de Explotación y es en 1987, ante las reiteradas denuncias de la Asociación de Vecinos del Llano, cuando lo presenta en la Dirección General de Industria de la CARM. En él, la cantera llega hasta el interior del propio núcleo urbano. Esto desencadenó una fuerte resistencia vecinal, que se plasma, a partir de enero de 1988, en la construcción de una pequeña cabaña de vigilancia en la que se turnan los vecinos día y noche, y en movilizaciones vecinales para evitar al avance de la nueva cantera hacia el pueblo. Poco a poco se fue ampliando esa cabaña inicial y con el paso de los meses se convirtió en una edificación de obra, "La Cabaña", construida por los propios vecinos. Este edificio se convirtió en un símbolo de la unión de todo el pueblo, en un referente a nivel regional y nacional de la lucha por su supervivencia y contra la explotación indiscriminada de los recursos de la zona por la multinacional francesa Peñarroya. Hoy día sigue siendo local de la asociación de vecinos.



Figura 8. Resistencia vecinal en el Llano del Beal ante el avance de los trabajos mineros en la Corta Los Blancos III o Sultana.

Como consecuencia de esta oposición, la Administración Pública fue poniendo restricciones al proyecto de Peñarroya, como limitaciones en las voladuras, limitación del trabajo a horas diurnas, imponiendo una retracción de los límites proyectados a 450 metros del pueblo. Pero aun así, la oposición social continuó, alcanzándose momentos críticos como los enfrentamientos con los antidisturbios en noviembre de 1989, que ocasionaron la pérdida de un ojo por pelota de goma a uno de los vecinos del pueblo. Finalmente, los planes de ampliar la Corta Sultana hacia El Llano se paralizaron con el cierre de la actividad minera en la comarca en 1991.

De Peñarroya a Portmán Golf y el cierre de la minería

En 1988 el Gobierno español, presionado por la entonces Comunidad Económica Europea (CEE), canceló la autorización de los vertidos al mar en Portmán y dio una pequeña moratoria a la compañía para cesarlos. Ese cese requería depositar los lodos en la parte alta de la sierra, en la fosa impermeabilizada de una antigua corta, lo que obligaba a la empresa a construir allí un nuevo lavadero para evitar así el problemático bombeo de los estériles a contrapendiente. Todo ello suponía unas enormes inversiones

económicas que la empresa no estaba dispuesta a asumir con la crítica situación del momento.

La Sociedad Minero-Metalúrgica de Peñarroya-España, en vista de circunstancias como la bajada de las cotizaciones de los minerales que ya no hacían tan rentable su actividad, el ingreso de España en la CEE, cuyas leyes medioambientales eran más estrictas a las nacionales, y los problemas ambientales y sociales originados en la zona, decidió a finales de 1988 suspender su actividad minera y vender minas, terrenos e instalaciones a la empresa cartagenera Portmán Golf, cuya actividad está ligada fundamentalmente a la construcción y con un proyecto urbanístico para la zona. Aun así, la empresa compradora mantuvo la actividad minera durante dos años más.

Ante el compromiso del cese de los vertidos contaminantes a Portmán, se llevó a cabo la construcción del lavadero Roberto II en el interior de la Sierra, junto a la Corta Tomasa. El 31 de marzo de 1990 se cerró de forma definitiva el vertido al mar de las tuberías del lavadero Roberto, que atravesaban a través de un túnel el Cabezo de La Galera y arrojaban 7.000 toneladas al día de productos tóxicos, procedentes del lavado y tratamiento del mineral. La actividad de lavadero se trasladó al Lavadero Roberto II, que estuvo utilizando la corta Tomasa para los vertidos de los estériles.



Figura 9. Concentración de trabajadores de Peñarroya en La Unión.

Finalmente, a principios de 1991, ante la oposición social a la corta Sultana y la nueva bajada de cotizacio-

nes, Portmán Golf presentó el expediente de cierre, que fue aceptado por la Administración. Con ello, se perdieron unos 300 empleos directos, más un número indefinido de empleos indirectos.

A la clausura de la minería se sumaría posteriormente la crisis industrial de Cartagena, con una serie de industrias que no tardaron en cerrar: principalmente la Fundición de plomo de Santa Lucía, la fábrica de productos químicos de la Unión Española de Explosivos, la factoría de Española del Zinc, y otras, dando lugar a una profunda depresión socioeconómica en la ciudad de Cartagena y su comarca, con un notorio crecimiento del desempleo y una falta de expectativas laborales y sociales, que se traducirá también en un estancamiento demográfico en la Sierra Minera.

Trazar un balance global de una actividad que se ha prolongado durante 150 años es un campo abierto al debate. En el haber hay que situar la fiebre edificadora de inicios del novecientos; unas cortas inversiones en infraestructura; unos efectos colaterales (industria derivada, incremento del tráfico mercantil...), aunque condenados a desaparecer con el sector; una escuálida derrama vía salarios e impuestos y unas teóricas divisas con las que contrapesar nuestras relaciones comerciales. En el pasivo un sufrimiento humano de difícil evaluación; el esquilmo de una riqueza nacional que hubiera podido servir para asentar la economía comarcana sobre bases sólidas -el reflujo de beneficios directos en el área (construcción, equipamientos...) fue mínimo durante la "era Peñarroya"-, y una aterradora cuestión ecológica aún pendiente de resolver.

2.2.7. La Sierra Minera en el siglo XXI: hacia un futuro de la comarca sobre nuevas bases

Con el inicio del nuevo siglo, la construcción de un nuevo futuro para la Sierra Minera se debate en torno a 4 ejes:

- 1) Cierre de la actividad minera vs mantenimiento de las concesiones mineras.
- 2) ¿Cómo ordenar el territorio? ¿Reconvertir los suelos mineros en suelos urbanizables?
- 3) ¿Cómo restaurar los terrenos contaminados de la Sierra Minera y la bahía de Portmán?¹
- 4) ¿Qué hacer con el patrimonio industrial y minero?²

Cierre de la minería y caducidad de las concesiones mineras

De los datos obrantes en el Servicio de Minas de la Dirección General de Energía y actividad Industrial y Minera, de la Consejería de Empleo, Universidades y Empresa de la Región de Murcia se deduce que en la

Sierra Minera de Cartagena y La Unión existen más de mil trescientas concesiones mineras otorgadas, caducadas o en trámite de caducidad³. La titularidad administrativa de las mismas corresponde, tanto a los últimos explotadores (Portmán Golf, S.L. y la Sociedad Minero-Metalúrgica de Peñarroya España, S.A.), como a diversas sociedades mineras, muchas de las cuales están actualmente desaparecidas, y también a particulares, algunos ya fallecidos.

La actividad minera en la Sierra de Cartagena y La Unión cesó en 1991, año en que la última empresa que explotaba los yacimientos a cielo abierto de Plomo y Zinc (Portmán Golf, S.L., sucesora de Peñarroya España, S.A.) solicitó la suspensión temporal de labores, (conforme a lo dispuesto en el art. 71 de la Ley de Minas y art. 93 de su Reglamento).

Esta situación de suspensión temporal autorizada se mantuvo desde el año 1991 hasta el año 2003, período durante el cual la empresa estuvo solicitando

¹ No incluimos en este artículo lo relativo a la bahía de Portmán, al quedar fuera de la cuenca vertiente del Mar Menor y no ser objeto de esta publicación.

² Sobre este punto ver el artículo "Recuperación del patrimonio cultural asociado a la actividad minera", incluido en este libro.

³ Los datos sobre concesiones mineras recogidos en este epígrafe proceden del "Estudio de la normativa de aplicación y de la situación jurídica del territorio y de los elementos que integran el BIC de la Sierra Minera de Cartagena - La Unión", realizado por Fundación Sierra Minera en 2019, en el marco del "Estudio de estrategias de conservación preventiva para el BIC del sitio histórico de la Sierra Minera"

sucesivas suspensiones temporales por períodos de un año y que fueron reconocidas por la administración regional para las concesiones de titularidad de Portmán Golf, S.L., con diversos condicionantes, como son los relativos a mantener la seguridad de las labores y la restauración de las cortas mineras en las que, habiéndose agotado el recurso mineral, existe obligación de realizar trabajos de restauración del espacio afectado por las labores si éstas fueron explotadas después de 1982 (año en el que entró en vigor el RD 2994/1982, de 15 de octubre, sobre restauración del espacio afectado por actividades mineras).

Las labores de restauración afectan a una superficie total de 132'8 ha, se localizan en lo que fue la explotación de las Cortas Gloria Este-San José, Brunita y Los Blancos III. También fueron recogidas en las Directrices de Ordenación Territorial de la Bahía de Portmán y Sierra Minera, aprobadas por Decreto de Consejo de Gobierno núm. 46/1995, de 26 de mayo (actualmente derogadas por Decreto núm. 57/2004, de 18 de junio, por el que se aprueban las Directrices y Plan de Ordenación Territorial del Litoral de la región de Murcia).

A partir del año 2004, la última empresa explotadora (Portmán Golf, S.L.) no volvió a solicitar autorización para la suspensión temporal de trabajos, por lo que sus concesiones deberían estar incursas en causa de caducidad al no haber solicitado la suspensión o la reanudación de trabajos.

Desde entonces, y aún con anterioridad, la Dirección General de Energía y Actividad Industrial y Minera de la CARM viene declarando la caducidad de concesiones mineras atendiendo, generalmente, a criterios de geográficos o de zonificación (Cuenca visual de la Bahía de Portmán, antiguas cortas mineras a cielo abierto dedicadas a usos no mineros, etc.), de forma que han caducado 812 concesiones mineras en los municipios de Cartagena y La Unión, de las más de 1.300 existentes.

Sin embargo, en el estudio jurídico citado, realizado en 2019 por Fundación Sierra Minera para el Ministerio de Cultura, se llevó a cabo una revisión de la situación de las concesiones mineras en el ámbito territorial declarado BIC como sitio histórico, concluyendo que en esa fecha todavía seguían activas el 71% de las concesiones mineras en los sectores declarados BIC, lo cual es un factor importante que condiciona enormemente los usos que se puedan implementar en los diversos conjuntos e instalaciones mineras. Posteriormente, en

estos últimos años, desde la Dirección General de Energía y Actividad Industrial y Minera se ha acelerado el proceso y se ha incrementado el número de concesiones mineras en las que se ha declarado su caducidad.

La ordenación del territorio de la Sierra Minera

En 1989 la empresa propietaria de los terrenos planteó en los ayuntamientos de Cartagena y de La Unión la recalificación de 1,5 millones de m² de terreno "Protegido Minero" a terreno "Urbanizable". Pero el planeamiento urbanístico que promovían los propietarios fue fuertemente cuestionado y no salió adelante.

En 1995 se abre una puerta a un futuro alternativo con el Decreto 46/1995 por el que se aprueban las Directrices de Ordenación Territorial de la Bahía de Portmán y de la Sierra Minera, tras un proceso de elaboración caracterizado por el trabajo conjunto de diversas administraciones y una amplia participación pública de los organismos, instituciones, movimientos ciudadanos, vecinos y público en general que se sintiera afectado. Esta normativa define un paquete global y concreto de directrices para la ordenación del territorio y un programa amplio de actuaciones para el desarrollo socioeconómico de la comarca, con precisión de los compromisos que corresponden a las diferentes administraciones y agentes privados implicados.

Sin embargo, estas Directrices apenas serán ejecutadas hasta que en 2002 se lleva a cabo la aprobación inicial de las nuevas Directrices y el Plan de Ordenación Territorial del Litoral de la Región de Murcia, que con respecto a la Sierra Minera se limitan a derogar a las anteriores, incluyendo gran parte de la Sierra Minera en la categoría de "suelos afectos por riesgo de minería". Esta afección condiciona la utilización del suelo para uso urbanístico a la recuperación del terreno y a la eliminación de los riesgos derivados del pasado minero. Pero no fija compromisos reales y efectivos para la restauración de la Sierra Minera, dejando esa recuperación a la iniciativa del propietario de los terrenos. El Consejo Económico y Social de la Región, cuestionó en su dictamen la derogación de las Directrices anteriores señalando que produciría "una regresión no justificada ni razonablemente entendible... que sean eliminadas por completo sin plantear antes una alternativa concreta de ordenación de la zona, al menos al mismo nivel de detalle

y compromiso público". Finalmente, en 2004 se aprueban las nuevas Directrices de Ordenación del Litoral, que siguen vigentes, y son derogadas todas las disposiciones y actuaciones previstas en las anteriores Directrices, aunque las nuevas incluirán a Portmán y la Sierra Minera como Actuación Estratégica y de Interés Regional, recogiendo así el mandato de la propia Asamblea Regional de 10/10/2002, que había aprobado una resolución por unanimidad en este sentido. Sin embargo, no se ha dado hasta el momento ningún paso para desarrollar esta Actuación de Interés Regional.

Otro elemento clave para el futuro de la Sierra Minera son los Planes Generales de Ordenación Urbana (PGOU) de los dos municipios concernidos. En el caso de La Unión, en el año 2003 se presentó el avance del nuevo PGOU, y en diciembre de 2005, el Ayuntamiento aprobó inicialmente el Plan, proponiendo reconvertir en urbanizable –de baja densidad– la gran mayoría del suelo de la Sierra Minera de La Unión, sobre todo en la cuenca visual de Portmán, optando por un crecimiento urbanístico desproporcionado como motor de desarrollo del Municipio y sin incorporar de forma adecuada la protección del patrimonio minero. Finalmente, el Ayuntamiento aprobó el Plan, aunque tras el cambio en las elecciones municipales en el 2007 fue revocado sin que se haya iniciado un nuevo proceso de elaboración del PGOU. Por tanto, siguen vigentes las anteriores Normas Subsidiarias de La Unión.

En el caso de Cartagena, desde 2005 se han sucedido varios intentos de aprobación de un nuevo PGOU, en los que se pretendía trasladar hacia la Sierra Minera los desarrollos urbanísticos que anteriormente se contemplaban en el Mar Menor. Tras su anulación por sentencia del Tribunal Supremo ha seguido vigente el Plan anterior de 1985. Sin embargo, recientemente el Pleno Municipal acaba de aprobar inicialmente un nuevo PGOU abriéndose el plazo de información pública para la presentación de alegaciones.

Estos dos Planes Generales de Ordenación Urbana serán clave para el futuro de la Sierra Minera, y es muy importante que en ellos se recoja de forma equilibrada el desarrollo urbanístico, basado en criterios de sostenibilidad, y la protección del patrimonio minero y cultural, como elemento central de la ordenación de este territorio, con un Catálogo completo de Bienes y Espacios Protegidos. Un paso importante en esta dirección es la próxima elaboración del Plan Especial del BIC de la Sierra Minera como sitio histórico, que se va a elaborar en coordinación de los dos ayuntamientos y financiado por la Dirección General de Patrimonio Cultural.

Iniciativas de restauración ambiental de la Sierra Minera

Además de la Bahía de Portmán, la otra gran asignatura pendiente del impacto ambiental dejado por la minería en la Sierra Minera son los residuos mineros contaminados esparcidos por toda la sierra, con altas concentraciones en metales pesados, que llegan a través de las ramblas al Mar Mediterráneo y, en mayor medida al Mar Menor, siendo una de las causas históricas de su deterioro. A lo largo de estas décadas se han llevado a cabo diversas iniciativas de restauración de depósitos mineros, por distintos agentes y con metodologías diferentes, en muchos casos con carácter experimental:

- 1) Eliminación de una balsa minera y traslado de los residuos a una corta: El único caso ha sido el de la Balsa Yenny, entre 2004 y 2007. El traslado se hizo sin impermeabilizar previamente la corta Los Blancos II y, posteriormente, la administración regional requirió a Portmán Golf el sellado de los estériles depositados en la corta.
- 2) Sellado de balsas de estériles. Se han realizado actuaciones con metodologías muy diversas:
 - a. Metodologías iniciales con sólo aporte de tierra vegetal y plantación:
 - Marqués de Péjar y Los Pajarillos, y balsa de estériles en la periferia del Cabezo Rajao, selladas en los años 80. También balsa de estériles junto a la Cuesta de las Lajas en La Unión.
 - b. Sellado con capa de filitas + tierra vegetal
 - Balsa de estériles de la Mina Segunda Primavera, en el entorno de Las Matildes. Proyecto Life Jara. 2003 -2005. Fundación Sierra Minera.
 - c. Encapsulado
 - Depósito de El Lirio: actuación iniciada en 2023 por la Dirección General de Energía y Actividad Industrial mediante un convenio entre esta Dirección General de la CARM y el MITECO, que financia la actuación, realizando las obras TRAGSA.
- 3) Fitoestabilización y/o tecnosuelos
 - Balsas de estériles de la mina Santa Antonieta y de El Gorguel. Proyecto Life Mipolare. 2010-2015 (utilización de tecnosuelo). UPCT.
 - Balsas de estériles en Peña del Águila II. Proyecto Life Tetraclinis. 2017-2018. Fundación Sierra Minera y ANSE.
 - Balsa de estériles en Peña del Águila I. Proyecto FiAmbRes, (2021-2022). UPCT.

Hay que destacar también un caso de restauración pasiva de otra balsa de estériles en la Peña del Águila, en la que se ha producido una colonización natural por la vegetación, sin intervención.

A raíz de la alarma social generada en el año 2017 por las posibles afecciones en la salud de los alumnos del colegio y la población del Llano del Beal, el Consejo de Gobierno de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, acordó la creación de un

grupo de trabajo para la elaboración del “Plan de Recuperación Ambiental de Suelos Afectados por la Minería” (PRASAM). En 2018 se elaboró la versión preliminar del Plan de Recuperación Ambiental de Suelos Afectados por la Minería, para el periodo 2018-2028 y se creó un comité de expertos, previendo también otro de participación social, que no se ha puesto en marcha. Sin embargo, no se ha realizado ni la evaluación ambiental ni la aprobación definitiva de este plan.



Figura 10. Fitoestabilización en la balsa de estériles de Peña del Águila II, con fajinas. Proyecto Life Tetraclinis.

Bibliografía

- Andreu, M. A., Berrocal, M^a C., Marín, C. y Vidal, M. (1995). Minería Tradicional y aspectos etnográficos en la Sierra Minera de Cartagena- La Unión. Memorias de Patrimonio nº 3. 1992-1993.
- Andreu, M^a A. y varios autores (2019). Estudio de la normativa de aplicación y de la situación jurídica del territorio y de los elementos que integran el BIC de la Sierra Minera de Cartagena – La Unión. Incluido en el “Estudio de estrategias de conservación preventiva para el BIC del sitio histórico de la Sierra Minera”, realizado por Fundación Sierra Minera para el IPCE.
- Antolinos, J. A., (2008). “Intervención arqueológica en el sector septentrional del Cabezo del Pino: Mina Balsa, Depositaria y Eloísa (Sierra Minera de Cartagena-La Unión)”, XIX Jornadas de Patrimonio Cultural. Intervenciones en el patrimonio arquitectónico, arqueológico y etnográfico de la Región de Murcia, I, Murcia, 125-128.
- Antolinos, J. A. y Manteca, J. I. (Eds.) (2005). Patrimonio minero de la Región de Murcia. Bocamina. Museo de la Ciencia y el Agua. Murcia.
- Baños, P. y varios autores, (2013). Portmán: de El Portus Magnus del Mediterráneo occidental a La Bahía Aterrada. Universidad de Murcia.
- Basilio, A. (1883) Memoria acerca de las minas de plomo argentífero y Cinz, Iberia, Montserrat, M^a de Los Angeles y Santa Catalina, situadas en el Cabezo de La Raja, Sierra de Cartagena. Cartagena.

- Berrocal, M^a C. y Egea, P. (1993). Modos tradicionales de vida y trabajo en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. *Cultura y Sociedad en Murcia*, nº 3. Universidad de Murcia. 1993. pp.471-503.
- Berrocal, M^a C. (1995). Aproximación al poblamiento romano de la Sierra Minera de Cartagena - La Unión, XXIV CNA. Elche 1995. pp. 111-117.
- Botella, F. de. (1868). Descripción Geológico Minera de las provincias de Murcia y Albacete. Madrid.
- Conesa, L. (2002). Los Alumbres Nuevos. Cartagena
- Domergue, C L. (1987). Catalogue des mines et fonderies antiques de la Peninsule Ibérique. Publication de la Casa de Velazquez. Serie Archeologie VIII. Madrid. ISBN: 84-409-1046-8
- Domergue, C L. (1990). Les mines de la Peninsule Ibérique dans l'Antiquité romaine. Publications de l'École française de Rome. Vol. 127. ISBN: 2-7283-0193-X.
- Domergue, C. (1987). Algunos aspectos de la explotación de las minas de la Hispania en la época republicana. X Symposium de Prehistoria i Arqueología Peninsular. II Reunió d'Economía Antigua en la Península Ibérica. Pyrenae, 21, 91-95.
- Domergue, C., (2003): "Nuestros conocimientos de la minería romana en Cartago Nova. Frente a los proyectos de regeneración de la Sierra de Cartagena". *Patrimonio Geológico y Minero y Desarrollo Regional*. Madrid.
- Fernández, F. A., Berrocal, M^a C., De Miquel, L., Marín, C., Egea, P., Martos, P. (2007). Patrimonio Cultural y Yacimientos de Empleo en la Sierra Minera de Cartagena – La Unión. 2ª Edición. Fundación Sierra Minera. La Unión.
- Ferrándiz, C. (2002). Los Almazarrones. Minería y Metalurgia a través del tiempo. Cartagena
- García, C. y otros autores (2005). Estudio integrado sobre contaminación medioambiental y análisis de riesgos en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. Estudio realizado por un equipo de la UPCT dentro del Proyecto Life Jara, que llevó a cabo Fundación Sierra Minera entre 2003 y 2005.
- Guillén, M. C. (2004). Los orígenes del siglo minero en Murcia. Murcia.
- Lasala, J. G. (1852). Minería de Cartagena. Sobre los trabajos antiguos y modernos practicados en el cerro de Sancti-Espíritus y sus adyacentes. *Revista Minera*, 3, 33-39.
- López, M. A., Pérez, M.A. (2010). La Unión. Historia y vida de una ciudad minera.
- Manteca, J. I. (2002). La Minería del Alumbre en Murcia. Bocamina. Patrimonio Minero de la Región de Murcia. Museo de la Ciencia y el Agua. Murcia
- Manteca, J. I., Pérez, M. A. y López, M. A. (2005). La Industria Minera en Murcia durante la época contemporánea. Bocamina. Patrimonio Minero de la Región de Murcia. Ayto. de Murcia. Museo de la Ciencia y El Agua, pg. 123-1134.
- Monasterio, J. (1846). Sobre el estado de la industria minera y metalúrgica de Cartagena al final del año 1845. *Anales de Minas* 4, pp. 287-352.
- Puche, O. (2005) La minería visigótica y musulmana en la Península Ibérica. Bocamina. Patrimonio Minero de la Región de Murcia. Museo de la Ciencia y el Agua. Murcia.
- Ramallo, S. F. y Berrocal, M^a C. (1994). Minería púnico - romana de Cathago-Nova. Minería y metalurgia en la España prerromana y romana. Actas de los Seminarios Fons Mellaria. Fuenteovejuna. Córdoba 1.992. P. 79-147.
- Rolandi, B. Templado, D. (1928). Catálogo de criaderos de Cinc del distrito minero de Murcia. *Boletín Oficial de Minas y Metalurgia*, 12, 599-648.
- SMMPE, 1985. Centro minero de la Sociedad Minera y Metalúrgica de Peñarroya-España, S.A. en Cartagena-La Unión. Monografía informativa, 23pp.
- SMMPE, 1984. Peñarroya España. El Libro del Centenario 1881-1981. 767 pg. Madrid.
- Vilar J. B. y Egea, P. (1985). La minería murciana contemporánea (1884-1930). Caja Murcia. Universidad de Murcia.
- Vilar J. B. y Egea, P. (1991). La minería murciana contemporánea (1930-1985). Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.
- Villasante, F. B. (1912): *Criaderos de hierro de la provincia de Murcia. Memorias del Instituto Geológico y Minero de España*. Madrid, IGME.

2.3. Recuperación del patrimonio cultural asociado a la actividad minera

AUTORES: Pedro Martos Miralles (Sociólogo. Gerente Fundación Sierra Minera). Francisco A. Fernández Antolinos (Licenciado en Historia y Arqueólogo. Director técnico del Centro Interpretación de la Mina Las Matildes). José Ignacio Manteca Martínez (Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor honorífico del Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica. UPCT)

2.3.1. La minería ha dejado en la Sierra Minera un patrimonio industrial y un paisaje cultural de extraordinario valor

Patrimonio industrial-minero y patrimonio geológico

Tras el cese definitivo de la actividad minera en 1991, la Sierra Minera de Cartagena – La Unión (SM) se ha convertido en un territorio con un valioso **patrimonio minero** enmarcado en parajes profundamente transformados por la mano del hombre que dan lugar a un paisaje cultural de gran singularidad y belleza, con una alta riqueza de restos arqueológico-industriales fruto de las distintos tipos de explotación y tecnologías utilizadas en las dos etapas, muy diferenciadas del proceso de industrialización: la minería subterránea del s. XIX y primera mitad del XX, y la minería a cielo abierto desde 1950 hasta 1991¹. Y desde 2015 está reconocido como BIC, en la categoría de sitio histórico. El valor de este patrimonio minero es excepcional:

En primer lugar por su amplitud y por la gran diversidad y tipologías de los elementos catalogados: castilletes de muy diferentes tipos, tanto de madera, como metálicos y de mampostería; numerosas casas de máquinas, que conservan todavía maquinaria original; chimeneas de máquina de vapor, de fundición, y de polvorín; hornos de calcinación, y también de prueba de fundición; lavaderos de las diversas fases y tecnologías; túneles, galerías de servicios y polvorines; grandes cortas mineras de la última fase de minería a cielo abierto; maquinaria como las loco-

motoras y vagonetas del antiguo tren minero, o las grandes máquinas excavadoras eléctricas de cables Rustun-Bucyrus. En total, en la última revisión del catálogo², se han incluido fichas de 311 elementos.

En segundo lugar, por la singularidad de algunos de sus elementos, como el malacate original de madera, único que se conserva probablemente en el mundo.

En tercer lugar, por la estrecha relación del patrimonio industrial y minero con el **patrimonio geológico** de gran valor e interés que existe en la zona, con un número importante de Lugares de Interés Geológico (LIG). En el reciente trabajo de catalogación se ha incluido un catálogo específico adicional de lugares y estructuras de interés geológico de 22 elementos que no coinciden con elementos mineros, además de otros 15 elementos de interés geológico que son a su vez elementos mineros.

En cuarto lugar, por conformar un impresionante paisaje cultural que convive con espacios naturales de alto valor ambiental, a la vez que con un territorio herido por los problemas de contaminación derivados de los graves impactos ambientales de la minería a cielo abierto.

Y, en quinto lugar, por su extraordinario potencial para articular un nuevo modelo de desarrollo soste-

¹ Ver el artículo en este mismo libro “Historia de la actividad minera en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión”, donde se describen ambas etapas.

² Actualización del catálogo de bienes culturales del BIC de la Sierra Minera de Cartagena y La Unión, realizada por Fundación Sierra Minera, entre 2019 y 2022. Disponible en la web de patrimonio histórico de la Región de Murcia: <http://www.patrimur.es/web/patrimonio-cultural/actualizacion-catalogo-bic-sierra-minera>

nible de esta comarca ligado al turismo ecocultural. La proximidad de la cuenca minera a una amplia población turística, de sol y playa (Mar Menor y Manga) así como cultural y de cruceros (Cartagena), multiplica las oportunidades de desarrollo de un turismo ecocultural en la SM.

Clasificación por sectores del BIC y conjuntos mineros

La declaración de BIC de la Sierra Minera como sitio histórico en 2015³ divide el BIC en 8 “sectores”, conforme se introdujo en la declaración de BIC anterior (Decreto núm. 93/2009), que sustituyó parcialmente al criterio utilizado en el primer expediente de BIC (de 1986) de organización por “conjuntos mineros”, y que incluía un territorio mucho más amplio. Conforme se justifica en el propio texto de la declaración de BIC, *“esta sectorización en áreas poligonales responde a criterios de singularidad y representatividad de los bienes identificados, lo que permite establecer una base para valorar el patrimonio existente en cada una de ellas y plantear*

medidas específicas de protección y conservación”. Los 8 sectores son:

- I: Conjunto del Cerro de La Parreta de Alumbres. 244.285,12 m².
- II: Conjunto del Cabezo Rajao. 744.124,31 m².
- III: Conjunto Minero de Lo Tacón. 28.818,7 m².
- IV: Conjunto Minero de El Llano del Beal y El Beal. 852.167,26 m².
- V: Camino del 33-Cuesta de Las Lajas. 2.277.560,92 m².
- VI: Rambla del Avenque y Cabezo de La Galera. 2.865.945,8639 m².
- VII: Cabezo de Ponce, Peña del Águila y Monte de Las Cenizas. Con una superficie total de más de 11.000.000 de m², al coincidir en gran parte con el Parque Regional de Calblanque, Monte de las Cenizas y Peña del Águila.
- VIII: Conjunto del Lavadero Roberto de Portmán. 41.451,70 m². De ellos, el II, III, IV, V y VII están ubicados total o parcialmente, en la cuenca vertiente al Mar Menor, mientras que el resto se localizan en la cuenca vertiente al Mediterráneo.

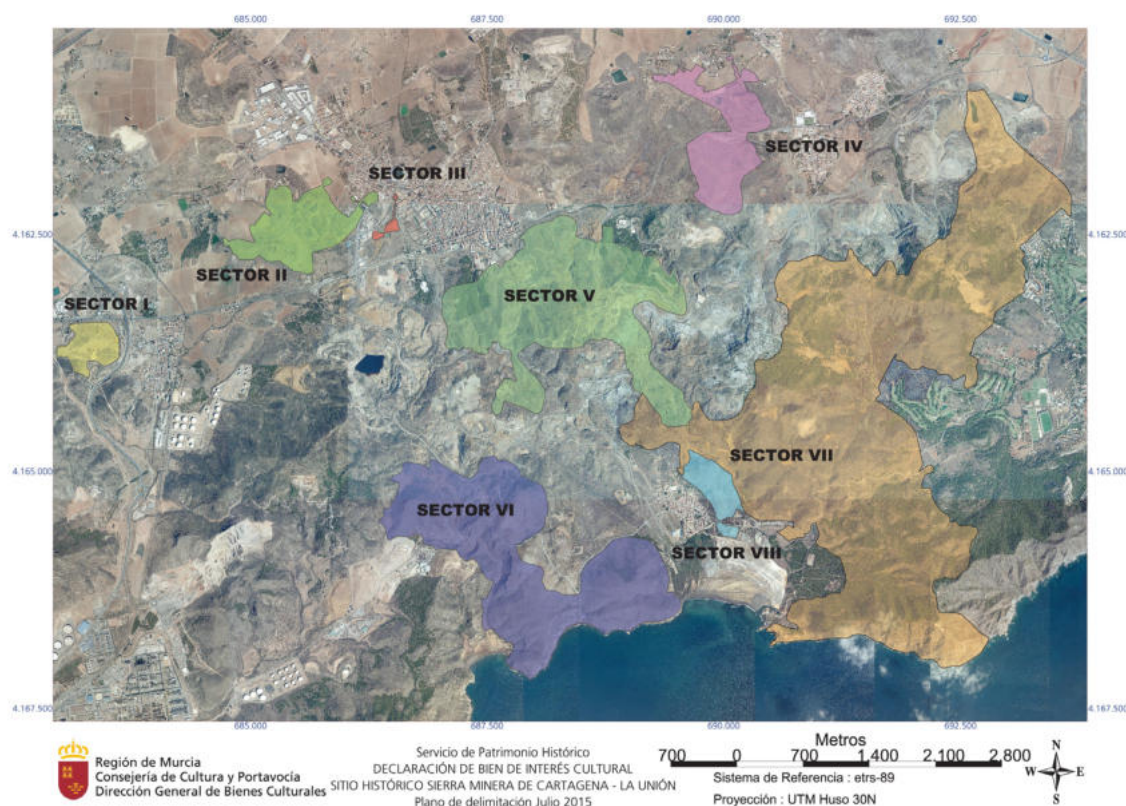


Figura 1. Plano de la ubicación de los 8 sectores del BIC.

³ Decreto n.º 280/2015, de 7 de octubre, del Consejo de Gobierno de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. BORM núm. 235, de 10 de octubre de 2015.

Pero más allá del territorio protegido como sitio histórico por la declaración de BIC, hay numerosos elementos del patrimonio industrial – minero, y muchos de ellos de gran relevancia, que quedan fuera del perímetro del BIC, aunque en la mayoría de los casos están recogidos en los catálogos de alguno de los dos ayuntamientos o en el propio catálogo de la CARM. Por ello, salvo en los sectores I, III y VIII que son de tamaño reducido y coinciden con conjuntos mineros concretos, los cinco sectores restantes, más los elementos no incluidos en el perímetro del BIC, se han organizado a una menor escala en conjuntos mineros, recuperando el concepto que se utilizó en el estudio sobre el patrimonio cultural de la SM publicado por Fundación Sierra Minera en 2002 y que se estuvo utilizando también en los primeros expedientes de BIC y en el propio Plan Director

de 2006. Para ello se han agrupado los elementos por cercanía y características comunes a nivel territorial y paisajístico, en función de los mismos criterios recogidos en la propia declaración de BIC para justificar la sectorización, antes citados: poder “plantear medidas específicas de protección y conservación”, con mayor coherencia, y facilitar “una correcta ordenación y gestión de las zonas protegidas, adaptándose con ello a los posibles escenarios más propicios y factibles para una planificación con criterios de desarrollo local sostenible y respetuoso con el entorno”.

En total se han identificado 22 conjuntos mineros⁴, más un área adicional amplia de la periferia de la SM donde se incluyen diversas zonas de Calblanque y el Campo de Cartagena con LIG.

CONJUNTO MINEROS		BIENES MINEROS	SECTORES BIC								NO BIC	LIG	TOTAL
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
1	LA PARRETA	14	14										14
2	ALUMBRES-ESCOMBRERAS	3									3		3
3	CABEZO RAJAO	9		9									9
4	PERIFERIA CABEZO RAJAO	23		19							4		23
5	LO TACON	6			6								6
6	EL DESCARGADOR	8					4				4		8
7	RAMBLA LAS MATILDES	3									3		3
8	EL BEAL	18				18							18
9	CABEZO DE DON JUAN	6				6							6
10	ESTRECHO SAN GINES	6							1		5	2	8
11	LLANO DEL BEAL	16							9		7		16
12	CABEZO DE PONCE	16							16				16
13	CABEZO DE LA PRIMAVERA	9							8		1		9
14	PEÑA DEL AGUILA	20							20				20
15	PEÑA DEL AGUILA/SUR	14							14				14
16	EL LAZARETO	4					1				3		4
17	CARRETERA DEL 33	21					16				5	10	31
18	EL GORGUEL	21						15			6		21
19	RAMBLA DEL AVENQUE	35						33			2	1	36
20	CABEZO DEL PINO	14						12			2		14
21	PORTMAN	31						6	14	5	6	4	35
22	SANCTI SPIRITU	14					10				4		14
23	ENTORNO SM											5	5
TOTAL ELEMENTOS		311	14	28	6	24	31	66	82	5	55	22	333

Tabla 1. Elementos catalogados por Conjuntos mineros y Sectores del BIC de la Sierra Minera.

⁴ Posteriormente se redujo el número de conjuntos mineros a 14 agrupando algunos de los conjuntos más pequeños y próximos.

Clasificación por tipos o categorías de elementos

Los elementos y bienes mineros evaluados, en función de sus características funcionales, se han clasificado en las siguientes categorías y códigos: K) Castilletes. Ch) Chimeneas. H) Hornos. L) Lavaderos. F) Fundiciones. P) Polvorines. Co) Cortas Mineras. M) Minados. MQ) Maquinaria Minera. CM) Caminos Mineros. T) Túneles.

El resto de los elementos se clasificaron en otras tres categorías:

- IM) Instalaciones Minero-Metalúrgicas: Infraestructura o instalación complementaria dedica-

da a las labores mineras o metalúrgicas: pozos, balsas, tolvas, planos inclinados, ... y edificios auxiliares vinculados a la minería (almacenes, oficinas, laboratorios, vestuarios, viviendas...).

- IT) Instalaciones de Transporte, Trituración o Molienda: Infraestructura dedicada al transporte, la trituración o la molienda en las tareas o faenas relacionadas con la minería.
- OT) Otros Edificios: Edificaciones no directamente de filiación minera, pero que han estado relacionadas con las labores mineras (viviendas, establos, centros de transformación de electricidad...).

A estos 14 tipos de elementos vinculados a la minería hay que añadir los LIG a los que se asignó el código G.

SECTOR	TIPO DE BIEN INDUSTRIAL - MINERO															TOTAL LIG	TOTAL GENERAL
	CH	CM	CO	F	H	IM	IT	K	L	M	MQ	OT	P	T	TOTAL		
I	2	0	0	0	0	5	0	1	3	0	0	1	1	1	14	0	14
II	4	1	0	0	0	8	0	11	3	1	0	0	0	0	28	0	28
III	1	0	0	0	0	1	0	3	1	0	0	0	0	0	6	0	6
IV	2	0	0	0	1	14	0	3	0	0	0	3	0	1	24	0	24
V	0	1	1	2	7	1	3	5	7	3	0	0	0	1	31	9	40
VI	3	6	0	0	5	18	1	9	12	1	1	6	2	2	66	2	68
VII	1	0	1	0	3	39	0	14	10	2	0	10	2	0	82	2	84
VIII	1	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	1	5	0	5
NO INC. BIC	6	0	6	2	11	3	1	17	7	0	1	0	0	1	55	9	64
Total	20	8	8	4	27	89	7	63	44	7	2	20	5	7	311	22	333

Tabla 2. Elementos y bienes mineros catalogados según tipo de elementos y sectores del BIC SM.

Un paisaje cultural a preservar

Los numerosos elementos de patrimonio industrial que pueblan la Sierra Minera vertebran y caracterizan el territorio, en especial los castilletes, chimeneas y hornos, como elementos icónicos que marcan y definen el paisaje.

Todos estos elementos patrimoniales forman una unidad y están íntimamente ligados a los contextos paisajísticos en los que se encuentran, conformando un PAISAJE CULTURAL singular y de gran valor e

interés, que es fruto del trabajo de miles y miles de mineros a lo largo de la historia.

Este paisaje construido, cumple con todos los requisitos para ser considerado paisaje cultural tal como lo define la propia ley del Patrimonio Cultural de la Región de Murcia: *"porción de territorio rural, urbano o costero donde existan bienes integrantes del patrimonio cultural que por su valor histórico, artístico, estético, etnográfico, antropológico, técnico o industrial e integración con los recursos naturales o culturales merezca una planificación especial"*⁵.

⁵ Ley 4/2007, de 16 de marzo, de Patrimonio Cultural de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, Art.61.d. BOE-A-2008-12526.

Como paisaje cultural tiene una enorme potencialidad para vertebrar el territorio, y por ello la ordenación del territorio de la Sierra Minera debe articularse en torno a su patrimonio natural y cultural - minero como eje vertebrador, en los respectivos planes de ordenación, convirtiendo en una de las prioridades de los dos municipios de la zona la pro-

tección, recuperación y puesta en valor de su rico patrimonio cultural como instrumento para el desarrollo sostenible de la zona, combinando la intervención en los elementos significativos del patrimonio minero, con las actuaciones de preservación del paisaje singular de este territorio y de restauración ambiental de las zonas degradadas.

2.3.2. Un patrimonio en peligro: abandono, deterioro y expolio

Estado lamentable de deterioro y expolio, agravado en las últimas décadas y acelerado en los últimos años

A pesar de estar formalmente protegido desde la incoación del primer expediente en 1986 para la declaración de BIC como sitio histórico, este patrimonio minero e industrial se encuentra en un estado lamentable de deterioro y expolio, que ha supuesto una gran pérdida patrimonial desde los años 80, acelerada en estas últimas décadas tras el cierre final de la minería en los 90, lo que pone en evidencia su fragilidad y vulnerabilidad, acrecentada por su amplia dispersión en el territorio.

En la revisión del catálogo realizada en 2019, sólo un 1,3% de los elementos se encontraban en un estado de conservación excelente y otro 16,7% en buen estado, mientras que el 50% se encontraba en un estado deficiente o muy deficiente. El estudio documenta de forma exhaustiva, elemento por elemento, el deficiente estado de conservación de la mayor parte del patrimonio industrial de la SM, y certifican el fracaso colectivo, social e institucional, en la conservación de este valioso patrimonio cultural cuya preservación para las generaciones futuras está en peligro si no se adoptan medidas urgentes para evitar su desaparición: castilletes deteriorados, caídos o expoliados, casas de máquinas o lavaderos derruidos, maquinarias destrozadas, chimeneas y hornos desplomados, vertidos de escombros y deterioro del paisaje,... dibujan un panorama desolador, sólo compensado por las escasas actuaciones de restauración y puesta en valor realizadas desde que en 2003 se inició la restauración de la Mina Las Matildes. La

situación en estos últimos años todavía ha empeorado aún más, salvo en algunas actuaciones puntuales, como la que se está realizando en la Mina Santo Tomás, en la Peña del Águila (sector VII).

Los factores que explican esta situación se pueden agrupar en 3 niveles:

- 1) La declaración formal de BIC no se ha traducido en suficientes medidas concretas y efectivas de protección y de conservación por parte de las administraciones públicas responsables. Ha faltado, por ejemplo, una adecuada señalización de los bienes del patrimonio minero en el terreno, así como actuaciones subsidiarias para evitar la pérdida de bienes en peligro. La inversión pública en este campo ha sido, hasta ahora, insuficiente.
- 2) La legislación vigente otorga a los propietarios de los bienes de interés cultural la obligación de *"conservarlos, custodiarlos y protegerlos para asegurar su integridad y evitar su destrucción o deterioro"*⁶, desde el momento de la incoación del expediente. Al ser de titularidad privada la mayoría de los terrenos y elementos incluidos en el BIC de la SM la colaboración de los propietarios de la SM es un requisito fundamental para preservar este valioso patrimonio, y para ello es necesario que se perciba que ese patrimonio es un elemento que da valor al territorio, y no un lastre. Pero el abandono y deterioro extremo en que se encuentra evidencia que ésta sigue siendo una gran asignatura pendiente, aunque en los últimos años, tras la declaración final del BIC en 2015, se han ido produciendo algunos avances en esa colaboración de los propietarios con las administraciones públicas.

⁶ Ley 4/2007, de 16 de marzo, de Patrimonio Cultural de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, Art.8.1.d. BOE-A-2008-12526.

- 3) Ha existido entre amplios sectores de la población un profundo desconocimiento y falta de conciencia e identificación con este patrimonio,

si bien se están produciendo avances significativos en la conciencia ciudadana respecto del valor de los restos de las explotaciones mineras.

2.3.3. Un patrimonio industrial insuficientemente protegido

Declaración de BIC de la Sierra Minera como sitio histórico

El proceso para la declaración de BIC tardó casi 30 años, desde que fue incoado expediente de BIC por primera vez en 1986. Pasaron 20 años sin que la administración regional completara la declaración de BIC y en 2006, tras declarar su caducidad, incoó un nuevo expediente que culminaría con la declaración de BIC en 2009, aunque posteriormente sería anulada por los tribunales en 2012, por lo que la Comunidad Autónoma volvió a incoar un tercer expediente que es el que vio finalmente la luz en 2015. Sin embargo, en este dilatado proceso el territorio declarado como BIC se ha reducido significativamente respecto al expediente inicial, sobre todo en términos cualitativos, al dejar fuera zonas y elementos claves del paisaje minero y romper la unidad de la gran área central antes ubicada en el corazón de la Sierra Minera.

La declaración de BIC como sitio histórico debía completarse con la elaboración de un Plan Especial que concretara y armonizara la protección de este patrimonio y paisaje minero en los dos municipios implicados⁷. Actualmente, la Dirección General de Patrimonio Cultural (DGPC) de la Región de Murcia, junto con los ayuntamientos de La Unión y Cartagena, están dando los pasos para que se pueda iniciar la elaboración de este Plan Especial.

Declaración de BIC de elementos singulares

Además de esa declaración de BIC de una parte importante de la Sierra Minera, y del Monasterio de San Ginés de la Jara, que fue declarado BIC, como Monumento, en 1992, en los últimos años se han sucedido algunas declaraciones de BIC de elementos singulares, por su relevancia histórica, cultural y patrimonial:

- 1) Decreto nº 175/2018, de 25 de julio, por el que se declara BIC el **Malacate Minero** que se conservaba en las instalaciones de la Cantera Emilia, en el término municipal de La Unión⁸. Es excepcional al ser el único malacate original de madera que se conserva probablemente en el mundo. Tras las solicitudes de Fundación Sierra Minera en 2017, la Dirección General de Bienes Culturales incoó expediente de BIC, resuelto en 2018. Posteriormente, tras ser cedido al Ayuntamiento de la Unión por Portmán Golf, ha sido restaurado e incorporado al nuevo Museo Minero de La Unión, como pieza fundamental del mismo.
- 2) Decreto nº 29/2019, de 13 de marzo, por el que se declara BIC con categoría de Sitio Histórico, el **Monte Miral o Cabezo de San Ginés de la Jara**, en el término municipal de Cartagena. El Cabezo de San Ginés de la Jara está situado junto al Monasterio de San Ginés de la Jara, y en él se encuentran ubicadas las ermitas del Monte Miral y Cueva Victoria, además de diversos yacimientos arqueológicos.
- 3) Decreto nº 47/2024, de 9 de mayo, por el que se declara BIC, con categoría de Lugar de Interés Etnográfico, a **Huerto Pío** (Villa Dolores), de Roche Alto, en La Unión⁹. El expediente fue incoado en 2022 e incluye el conjunto del Parque Ambiental de Huerto Pío creado por Fundación Sierra Minera desde el año 2000, con la noria del siglo XIX restaurada, junto con la antigua vivienda del que fue uno de los empresarios mineros más destacados en el final del siglo XIX y principios del XX, Pío Wandossell.

Catálogos de protección de los Ayuntamientos

También es insuficiente la protección de este patrimonio y paisaje industrial en el planeamiento de los dos ayuntamientos:

⁷ Ley 4/2007, de 16 de marzo, de Patrimonio Cultural de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, art 44.1.

⁸ BORM nº 175, 31/07/2018

⁹ [BORM nº 117, 22/05/2024](#)

- Los intentos de revisión del PGM de Cartagena, aprobados por el Ayuntamiento en 2012 y 2016 pretendían hacer urbanizable en la Sierra Minera todo aquel territorio no protegido expresamente por normas de rango superior, sin tener en cuenta adecuadamente el patrimonio industrial y minero de la zona. Al ser anulados por los tribunales ha permanecido vigente el PGM de 1985. El Catálogo de Elementos Protegidos es incompleto, al dejar fuera del mismo la mayor parte de los elementos que integran el patrimonio minero y no recoger la totalidad de los bienes catalogados por la Comunidad Autónoma, tanto los incluidos en la declaración de BIC como sitio histórico, como los que quedan fuera del territorio incluido en esa declaración, así como los LIG. Recientemente el Pleno del Ayuntamiento de Cartagena ha aprobado inicialmente un nuevo Plan, e iniciado su proceso de información pública, abriéndose una oportunidad para mejorar sustancialmente la protección del patrimonio minero del municipio de Cartagena.
- El Ayuntamiento de La Unión en 2013 aprobó inicialmente una “Revisión del Catálogo de Bienes Protegidos”, en el que se incorpora ampliamente y de forma rigurosa el patrimonio minero y geológico del municipio con un catálogo específico, junto con los yacimientos arqueológicos y los edificios y elementos singulares. Sin embargo, sigue pendiente de aprobación definitiva.

El paisaje minero de La Unión y Cartagena en el Plan Nacional de Patrimonio Industrial y en la lista de candidaturas para Patrimonio de la Humanidad

A nivel nacional, el Paisaje Minero de La Unión y Cartagena está incluido dentro del Plan Nacional de Patrimonio Industrial, y esto motivó que en 2006 el Ministerio de Cultura promoviera la realización de un Plan Director del Paisaje Industrial de la Sierra Minera. Posteriormente, ya en 2019 el Instituto de Patrimonio Cultural de España (IPCE) encargó a Fundación Sierra Minera el Estudio de Estrategias de Conservación Preventiva para el BIC del sitio histórico de la Sierra Minera de Cartagena – La Unión.

La importancia patrimonial de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión ha posibilitado su inclusión en la lista tentativa de candidaturas para *Patrimonio de la Humanidad* de la UNESCO, junto con otros distritos mineros del país, desde 2007¹⁰. A este respecto, el Comité Internacional para la conservación y defensa del Patrimonio Industrial (TICCIH- España), en el año 2010, incluyó a la Sierra Minera de Cartagena-La Unión en la Exposición denominada “100 Elementos del Patrimonio Industrial en España”.

2.3.4. Un patrimonio industrial insuficientemente recuperado

Las iniciativas pioneras, ya en este siglo XXI, de recuperación y puesta en valor de algunos elementos más destacados, como el Centro de Interpretación de la Mina Las Matildes y el Parque Minero de La Unión, tienen una gran importancia para dibujar un futuro diferente de la SM, pero son también insuficientes:

Restauración de la Mina Las Matildes

Entre 2003 y 2005, la Fundación Sierra Minera llevó a cabo la rehabilitación integral de las dos casas de

máquinas y el castillete metálico de la Mina Las Matildes, junto con la restauración ambiental y paisajística del entorno, y la musealización de este espacio minero, reconvirtiendo la mina en un moderno Centro de Interpretación de la minería y el medio ambiente de la SM, y en particular de la especificidad de las minas del entorno del Beal dedicadas al desagüe de la cuenca minera. Desde su inauguración en el año 2005, permanece abierto al público, realizando además itinerarios guiados por el conjunto de la SM. De este modo, la Mina Las Matildes se ha convertido en un referente cultural en nuestra Región para el acercamiento al público del valioso patrimonio industrial de la SM.

¹⁰ <http://whc.unesco.org/en/tentativelists/5139/>. La propuesta fue aprobada por el Consejo del Patrimonio Histórico del Ministerio de Cultura en su reunión de 29 y 30 de junio de 2006.



Figura 2. Mina Las Matildes restaurada desde 2005.

Parque Minero de La Unión

Posteriormente, a través del Consorcio Turístico Sierra Minera, se llevó a cabo la adecuación de la Mina Agrupa Vicenta y la apertura del Parque Minero de La Unión en 2010. Se trata de la primera y única mina subterránea de la Región de Murcia musealizada y acondicionada para la visita, con más de 4.000 m² abiertos al público. Además, el Parque Minero, con una superficie de 50.000 m², ha supuesto la recuperación de un amplio conjunto de instalaciones mineras de los siglos XIX y XX que permiten ver el proceso completo de la anti-

gua industria minera subterránea, desde la extracción del mineral hasta su lavado y concentración, y la posterior obtención de metal en las fundiciones. Entre ellas destaca el lavadero de Mina Remunerada que cuenta con un elevado número de round buddles o “rumbos”. El Parque Minero se abrió al público en julio de 2010, y en los dos primeros años fue gestionado por la Fundación Sierra Minera, siendo posteriormente gestionado por una empresa privada. En 2020 se cerró por la pandemia, y desde entonces sigue pendiente de que se completen obras de acondicionamiento del interior de la mina para que sea abierto al público.



Figura 3. Interior de la mina Agrupa Vicenta en el Parque Minero de La Unión.

Adecuación de la Mina-Cueva Victoria

Es una cueva kárstica con numerosas galerías y abundantes restos fósiles, que lo convierte en uno de los yacimientos paleontológicos más importantes de Europa, habiéndose documentado más de 90 especies de vertebrados, a los que según las últimas dataciones se les atribuye una edad absoluta de 0,9 millones de años, y entre los que destacan varios fragmentos óseos pertenecientes al género

Homo. Además, Cueva Victoria fue también explotada como mina de hierro y manganeso, desde finales del XIX hasta mediados del XX. En 2012, desde el Consorcio Turístico Sierra Minera y el Ayuntamiento de Cartagena se realizaron actuaciones de adecuación para hacerla visitable, concentradas en la zona denominada Cueva Victoria II, aunque quedaron sin completar algunos trabajos, y sigue pendiente desarrollar las correspondientes actuaciones en el sector de Victoria I, que es donde se encuentran los principales yacimientos de fósiles y el que presenta mayores problemas de seguridad.

2.3.5. Estrategias para la conservación del patrimonio minero

En 2020, Fundación Sierra Minera entregó al IPCE el estudio citado de **Estrategias de Conservación Preventiva para el BIC del sitio histórico de la Sierra Minera de Cartagena – La Unión**¹¹. El estudio, que también fue entregado a la administración regional y a los dos ayuntamientos, define una hoja de ruta que sirva de base a las intervenciones para preservar el patrimonio minero de esta zona. Las 6 estrategias que se proponen están enfocadas a evitar la pérdida de los elementos que componen cada conjunto, desde una óptica de emergencia por la precaria situación en la que se encuentra la mayor parte de los bienes del patrimonio industrial de la SM. Debe tenerse en cuenta que se está interviniendo sobre un BIC, por lo que es preciso que prevalezca el criterio de conservación y consolidación sobre cualquier otro. Por tanto, de forma general debe descartarse la eliminación de construcciones por el simple hecho de eliminar un riesgo.

Esto no es óbice para que se incluyan actuaciones de restauración en aquellos elementos de mayor valor patrimonial y significación cultural, que puedan tener más posibilidades de ser incorporados a proyectos de puesta en valor del patrimonio de la SM, y a la vez puedan servir de motor dinamizador del conjunto de la SM.

Limpieza y consolidación básica

Para frenar el deterioro y conservar los elementos del patrimonio industrial de la SM, y su entorno, como hitos del paisaje minero y testigos de la historia, un primer nivel de intervención es el de su limpieza y consolidación básica, con actuaciones de:

- Desescombro, limpieza del elemento y de su entorno, para mejorar la seguridad, tanto de los elementos patrimoniales como de los posibles visitantes.
- Desbroce, poda o eliminación de vegetación invasiva que impida o dificulte la visibilidad de los elementos o perjudique su conservación.
- Consolidación básica de construcciones y estructuras para atajar los procesos de degradación por agentes atmosféricos, expolio, vandalismo y otras causas, principalmente mediante el sellado de grietas en muros, y protegiendo éstos de las filtraciones del agua de lluvia.

¹¹ Disponible en <https://fundacionsierraminera.org/informes-y-propuestas/estrategias-de-conservacion-preventiva-para-el-patrimonio-industrial-de-la-sierra-minera/>



Figura 4. Mina San Lorenzo. Conjunto minero de la periferia del Cabezo Rajao.

Eliminación de riesgos

Las intervenciones aquí incluidas son las más prioritarias, porque se trata de garantizar la seguridad y salud de la población que vive en el entorno de la SM

y de las personas que la visitan, eliminando o minimizando los grandes riesgos que todavía representan numerosas instalaciones mineras abandonadas en pésimas condiciones y los residuos mineros contaminados que se encuentran en su entorno:



Figura 5. Pozo minero sin brocal a la izquierda y pozo con brocal reconstruido a la derecha. Conjunto minero de la Peña del Águila.

- **Construcción o reparación de brocales de pozos mineros**, en al menos 130 pozos peligrosos, utilizando su tipología constructiva tradicional, de modo que no tengan un impacto visual negativo sobre el entorno.
- Vallado o **barandillas de protección** en zonas peligrosas.
- Retirada de cubiertas y otros elementos **de fibrocemento**.
- **Descontaminación** de suelos y de instalaciones.

Consolidación y refuerzo de estructuras

Se trata de **actuar en los elementos patrimoniales que corren peligro de desaparición**, priorizando aquellos situados en los conjuntos mineros de mayor valor patrimonial. Se proponen:

- **Tratamientos de consolidación y protección de castilletes**, para frenar el deterioro

que lleva a la pérdida de estos elementos emblemáticos del paisaje minero, **con una intervención adecuada que garantice su conservación en el tiempo.**

- **Refuerzo y consolidación de chimeneas.** Por la casuística del catálogo patológico que afecta a las chimeneas, se deberán realizar distintas operaciones según el caso. La más inmediata y sencilla es la de restituir el material de fábrica en zonas donde se ha perdido. Una segunda más grave es la de las grietas que, según su importancia, requerirán bien de sellado de las mismas, de zunchado con platabandas metálicas en formación de anillos, o mediante el desmontado, pieza a pieza, para posibilitar su reconstrucción posterior.
- **Refuerzo y consolidación de hornos.** Estos elementos de fábrica de ladrillo y mampuesto presentan patologías en sus estructuras murarias, así como deterioro o ruina de los anillos metálicos que los encorsetan. Su reparación pasa por: restituir el material que falta, bien con ladrillo o con mampuesto, lo que sucede básicamente en zonas bajas debido principalmente al expolio del material; revestir sus fábricas, tanto interior como exteriormente; y tratamiento de los elementos metálicos de zunchado protegiéndolos de la exposición atmosférica con reposición, cuando así lo requiera, de los anillos de acero de las mismas características.
- **Refuerzo y consolidación de edificaciones con riesgo de derrumbe,** para garantizar su durabilidad. Se trata de recomponer los diferentes muros de una edificación, por ejemplo, de una casa de máquinas, para que interactúen y así garantizar la estabilidad del conjunto. Para ello podrían abordarse reconstrucciones parciales, antes de que los niveles de material cerámico y piedra sean borrados o alterados hasta el punto de imposibilitar una interpretación que permita en el futuro su comprensión como elemento individual y su importancia dentro del conjunto. En las intervenciones es preciso utilizar morteros y materiales similares o idénticos a los originales, como ladrillo cerámico, mampuesto o madera.
- **Tratamientos de protección de maquinaria minera,** tanto de los elementos metálicos con la aplicación de protección anticorrosión, como en los elementos de madera, como por ejemplo las baterías de celdas de flotación.

- **Medidas de protección contra el expolio.** En aquellos elementos de mayor valor patrimonial y más desprotegidos, se podría valorar la instalación de sistemas de video vigilancia.



Figura 6. Castillete de madera caído, y restaurado, mina Santo Tomás (Peña del Aguila).

Adecuación de accesos e itinerarios

Las actuaciones sobre los accesos a los distintos conjuntos y elementos mineros deben tener una doble funcionalidad: 1) *Poner en valor el paisaje cultural de la SM facilitando el acceso al público en los distintos conjuntos mineros.* 2) *Dificultar el expolio de los elementos, restringiendo el acceso en vehículo privado hasta ellos.*

- **Adecuación de caminos mineros y de acceso a conjuntos mineros**, para facilitar el acceso peatonal y poner en valor aquellos caminos mineros que forman parte del patrimonio y el paisaje cultural de la SM.
- **Itinerarios que articulen los conjuntos patrimoniales de la SM**, que deben facilitar la realización de recorridos por los distintos conjuntos mineros y la conexión y articulación entre ellos.
- **Habilitación de miradores** en aquellas áreas más destacadas a nivel paisajístico.
- **Adecuación – señalización de zonas de aparcamiento**, para facilitar el acceso a los conjuntos mineros.

Señalización e interpretación

Es una actuación de gran importancia para la conservación de los elementos y debe incluir tanto los bienes de los diferentes conjuntos mineros, como los caminos de la Sierra que permiten el acceso a los mismos. Tiene una triple funcionalidad: 1) Divulgativa y de puesta en valor de los elementos y del territorio. 2) Disuasoria contra el expolio. 3) Identificación y minimización de riesgos.

Se debe realizar un plan de señalética con un diseño atractivo de los diferentes tipos de carteles y señales a utilizar, que sea homogéneo y permita identificar a los elementos como parte del BIC de la SM, o como bienes catalogados, con una marca o distintivo propio. Los tipos de carteles y señales serán de diversas características, tamaño, contenido y funcionalidad:

- Carteles interpretativos de conjuntos mineros con una descripción general del conjunto y de los elementos que lo componen.
- Carteles de identificación de los distintos elementos mineros.
- Carteles interpretativos del paisaje minero en miradores.
- Señalización de riesgos, para prevenir cualquier tipo de accidente de los visitantes.
- Señalización de caminos e itinerarios, para facilitar el acceso.

Restauración de aquellos elementos de mayor valor patrimonial y significación cultural

La restauración parcial o integral de algunos de los elementos más relevantes es el escalón superior en el conjunto de estrategias para la conservación del patrimonio industrial de la SM. De los 328 elementos en los que se han valorado propuestas de conservación, sólo en 7 se propone una restauración integral, y en otros 27 una restauración parcial, lo que representa sólo el 10% del total de los elementos.



Figura 7. Castillete, salas de máquinas y de calderas, y chimenea de la Mina Montserrat. Cabezo Rajao.

Estrategias complementarias

Para implementar esas estrategias son necesarias medidas complementarias que las hagan posibles:

- 1) Promover la participación de los propietarios en la conservación, custodia y protección del patrimonio minero.
- 2) Impulsar la vigilancia sobre el patrimonio minero.
- 3) Incrementar la sensibilización y participación ciudadana.
- 4) Coordinación entre las administraciones y actores implicados. En este sentido se está intentando crear una mesa de trabajo entre las 3 administraciones.
- 5) Mejorar la protección, con la elaboración del Plan Especial del BIC y la mejora de los catálogos de los dos ayuntamientos.

2.3.6. Iniciativas de conservación – recuperación del patrimonio en los últimos años

Consolidación de las instalaciones del conjunto minero de La Parreta (sector I del BIC) Este conjunto minero había sufrido en los últimos años un deterioro muy grave, debido especialmente a diversos episodios de expolio y a la falta de medidas adecuadas de protección y conservación. En 2016 Fundación Sierra Minera presentó a la DGPC un informe con propuestas de intervención. En 2019 la Dirección G. de Patrimonio Cultural abrió expediente sancionador a la empresa propietaria de la mayor parte de este conjunto minero, que presentó un proyecto amplio de conservación de las instalaciones mineras, y ha desarrollado en estos últimos años obras de consolidación.

Intervención de emergencia en el Lavadero de El Lirio (sector VII del BIC, dentro del conjunto minero de Ponce). Es una de las instalaciones más emblemáticas por el gran transporte de obra desde mina Josefita, similar a un acueducto. En 2021, desde Fundación Sierra Minera se presentó a la DGPC una memoria valorada de una intervención de emergencia en los pilares dañados del transporte del lavadero, para evitar el colapso de todo el conjunto. Finalmente, en diciembre de 2022 se completó su reparación, evitando así la pérdida irreparable de esta extraordinaria instalación minera.

Restauración del Castillete y Casa de Máquinas de la Mina Santo Tomás (sector VII, conjunto minero de Peña del Aguila). A partir de la propuesta presentada en 2021 por Fundación Sierra Minera al Parque Regional de Calblanque, Peña del Aguila y Monte de las Cenizas, entre 2022 y 2024 se está realizando esta intervención dividida en 4 fases: recuperación del castillete, conservación – restauración de la casa de máquinas, construcción del brocal del pozo y reconstrucción de la cubierta de la casa de máquinas. Es la primera vez que se levanta de nuevo un castillete caído en la Sierra Minera.



Figura 8. Lavadero El Lirio, conjunto minero de Ponce.



Figura 9. Castillete y casa de máquinas de la Mina Santo Tomás restaurados.

Consolidación chimenea y casa de máquinas de la Mina Camarón (No incluida en el BIC, conjunto minero de El Gorguel). Ante el riesgo de colapso de esta chimenea, en 2021 se presentó desde Fundación Sierra Minera una memoria valorada a la empresa responsable del vertedero municipal de residuos del Ayuntamiento de Cartagena (Lhicansa) y a la Dirección G. de Patrimonio Cultural para realizar una actuación de emergencia, que implica el desmontaje parcial y reconstrucción de la chimenea. Sin embargo, 3 años después, la actuación sigue en tramitación.

Túnel José Maestre y vía férrea (Sector VIII, conjunto minero de Portmán). En el marco del Plan de Sostenibilidad Turística de Portmán que está desarrollando el Ayuntamiento de La Unión, desde Fundación Sierra Minera se ha elaborado un proyecto de recuperación del patrimonio industrial del Túnel José Maestre, tren minero y Chimenea de la Fundición Orcelitana, cuyas obras está previsto iniciar este mismo año, en una 1ª fase. Así mismo, se ha elaborado otro proyecto para poner en valor el recorrido de las tuberías de “Los Chorros” del Lavadero Roberto y adecuar un itinerario a la ventana tectónica de Cola del Caballo.

El MAPRMM: una oportunidad histórica para la recuperación del patrimonio minero.

El Marco de Actuaciones Prioritarias para la Recuperación del Mar Menor, que el MITECO está implementando, ha abierto un escenario nuevo en la Sierra Minera. Los dos grandes grupos de proyectos previstos en la SM, (1) de restauración de emplazamientos mineros peligrosos abandonados y zonas afectadas por la minería, y (2) de restauración hidrológico forestal en la cuenca vertiente del Mar Menor, van a suponer que una importante superficie de la Sierra Minera pase a ser de titularidad pública, vía acuerdo de cesión de sus propietarios o expropiación. En la medida en que las áreas de actuación previstas incluyan también las instalaciones del patrimonio minero localizadas en las mismas, se facilitará la posibilidad de intervención desde las administraciones públicas para su recuperación, al dejar de ser de titularidad privada. Es por tanto, una oportunidad histórica para que la conservación del patrimonio industrial pueda complementar a las actuaciones de restauración ambiental.

Bibliografía

- Fernández, F. A., Berrocal, M^a C., De Miquel, L., Marín, C., Egea, P., Martos, P. (2007). Patrimonio Cultural y Yacimientos de Empleo en la Sierra Minera de Cartagena – La Unión. 2ª Edición. Fundación Sierra Minera. La Unión.
- Fernández, F.A., Martos, P., Manteca, J.I., Mouzo, R., (2013). Patrimonio Cultural en la Bahía de Portmán y su entorno. Capítulo III del libro Portmán: de El Portus Magnus del Mediterráneo occidental a La Bahía Aterrada. Universidad de Murcia.
- García, C., Manteca, J.I., Martos, P. y Robledo, A., (2008). Riesgos ambientales en caminos públicos y vías pecuarias en el ámbito de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión en relación con actividades de senderismo y turismo cultural. Actas del VI Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. X Sesión Científica de SEDPGYM.
- Martos, P. (2007). Una experiencia de puesta en valor del patrimonio minero: El Centro de Interpretación Mina Las Matildes. XVIII Jornadas de Patrimonio Cultural. Intervenciones en el patrimonio arquitectónico, arqueológico y etnográfico de la Región de Murcia. Vol. I. Consejería de Cultura, Juventud y Deportes. Murcia.
- Martos, P. (2010). El paisaje minero de la Sierra de Cartagena-La Unión, como paisaje cultural. Actas V Congreso Conservación del Patrimonio Industrial y de la Obra Pública en España.
- Martos, P., Fernández, F.A., Manteca, J.I. (2018). El Patrimonio Industrial de la SM de Cartagena – La Unión. Actas XXIV Jornadas de Patrimonio Cultural Región de Murcia.
- Martos, P., Fernández, F.A., Manteca, J.I., Rosique, M.F. (2020). Actualización del Catálogo de bienes Culturales del BIC de la SM de Cartagena – La Unión, 2ª Fase. Actas XXVI Jornadas de Patrimonio Cultural Región de Murcia.
- Martos, P., Fernández, F.A., Manteca, J.I., Chacón, J.M., Ibero, A. (2021). Estrategias de conservación preventiva para el BIC del sitio histórico de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. Actas XXVII Jornadas de Patrimonio Cultural Región de Murcia.

2.4. Riesgos ambientales actuales en la S^a Minera de Cartagena-La Unión debidos a procesos de contaminación asociados a instalaciones de residuos mineros abandonadas

AUTORES: Julio César Arranz González, Francisco Javier Fernández Naranjo, Virginia Rodríguez Gómez y Paula Adánez Sanjuan.
Grupo de Investigación en Residuos Mineros y Geoquímica Ambiental (CN-IGME, CSIC).

2.4.1. Introducción

La Sierra Minera de Cartagena-La Unión ha sido uno de los distritos mineros más importantes de España, en el que se explotaron fundamentalmente Pb, Zn, Ag y Fe, presentes originalmente en menas de sulfuros metálicos o en gossans (Manteca & Ovejero, 1992). La actividad minera se ha prolongado en la zona a lo largo de más de 2000 años, si bien el paisaje minero actual es consecuencia sobre todo de la actividad del siglo XX, que ha dejado un vasto legado de áreas alteradas y residuos mineros abandonados, origen de importantes impactos y riesgos ambientales sobre el entorno, en buena parte debidos a su potencial contaminante.

Las actuaciones de remediación y rehabilitación programadas en el área afectan a varios tipos de residuos mineros, tal y como se entiende en la normativa española:

1) Lodos de flotación. Desde el punto de vista de la importancia que tienen los diferentes tipos de residuos en cuanto a ocupación superficial y volumen, en las cuencas de las ramblas vertientes al Mar Menor, dominan claramente los lodos de flotación, vertidos en lo que se conoce como presas mineras o, localmente, pantanos. Los residuos de flotación proceden del proceso por el cual se separa la mena de la ganga, previa mezcla con agua del material finamente molido hasta formar una suspensión, a la que se añaden diferentes reactivos y se burbujea con agua. El objetivo es que los minerales de interés (hidrófobos) se unan a reactivos oleosos y formen una espuma que flota, mientras los minerales de la ganga sedimentan en el fondo como residuo del proceso. Estos residuos se vertieron en forma de pulpa en las presas y se abandonaron.

2) Estériles de corta. También son importantes los estériles procedentes de las cortas mineras, o vacíos, en la cabecera de las ramblas de Miedo, Matildes y Ponce. Se trata de una mezcla de todos los tipos de rocas que están presentes alrededor y recubriendo cada uno de los yacimientos explotados por minería a cielo abierto.

3) Estériles de gravimetría. Los residuos de gravimetría se generaban por un proceso basado en la diferencia de densidades que existe entre la mena y la ganga (más ligera) después de un chancado y molienda. Los residuos de gravimetría fueron importantes al sur de la población del Llano del Beal, formando terreras de material formado por elementos de tamaño grava y arena. Muchas de ellas fueron después sometidas a procesos de flotación.

Los residuos mineros contienen metales y semimetales potencialmente tóxicos asociados a sulfuros de diferentes tipos. Como es sabido, los procesos de oxidación y generación de acidez que se producen en residuos mineros con sulfuros dependen originalmente de la naturaleza de los mismos y de la descompensación que existiera originalmente entre minerales generadores de acidez y minerales con capacidad neutralizante.

Además de los residuos citados anteriormente, las escorias procedentes del rechazo de hornos de fundición, conocidas en la zona como gachas, amontonadas en gacheros, son importantes en el entorno del colegio de La Unión. Las escorias de fundición son materiales predominantemente gruesos, de naturaleza ferruginosa y silicatada, elevada densidad y textura vítrea.

2.4.2. Procesos de contaminación asociados a los residuos minero-metalúrgicos sobre el Mar Menor

La problemática que representan los residuos mineros y mineralúrgicos con elevados contenidos en elementos potencialmente tóxicos está asociada a dos tipos de procesos. Por un lado, los procesos erosivos que los convierten en fuentes de emisión de sedimentos de carácter contaminante y, por otro, la disolución de fases solubles enriquecidas en dichos elementos.

Los elementos potencialmente tóxicos movilizados como material particulado pueden estar asociados a óxidos e hidróxidos, o formando parte de la estructura cristalina de diferentes especies minerales, así como formando parte de la composición de sales solubles. Cuando el material desplazado no es soluble y se deposita en terrenos aledaños o cauces, la movilidad o biodisponibilidad de los elementos traza dispersados como material particulado dependerá de en qué medida se solubilizan en función de las condiciones fisicoquímicas, tales como el pH o el potencial redox de los suelos y sedimentos receptores (Alloway, 2013), siempre y cuando el material depositado no pase a ser dominante. La dispersión de material particulado sobre los suelos del entorno de las instalaciones, por erosión eólica, y el aportado a los cauces por erosión hídrica han sido demostrados en diversos trabajos (e.g.: García-García, 2004; Navarro-Hervás, 2006, 2008; Robles-Arenas et al., 2006; Belmonte Serrato et al., 2010; González-Fernández et al., 2010; García-Lorenzo et al., 2012; Sánchez-Bisquert et al., 2017; Fernández-Naranjo et al., 2020; Martín-crespo et al., 2020). Parte del material desplazado por erosión eólica es soluble y se puede producir una deposición húmeda por la lluvia que arrastra y disuelve los elementos tóxicos. Este proceso ha sido constatado en el caso del Mar Menor por Alcolea-Rubio (2015), el cual apunta a que el máximo

contenido metálico soluble que le llega procede de este proceso.

Al margen de lo que le pueda llegar desde la atmósfera, en lo que respecta al Mar Menor, gran parte del potencial contaminante de los residuos mineros se hace efectivo mediante el transporte, tanto de material particulado como disuelto, en aquellos eventos de precipitaciones que son capaces de generar la suficiente escorrentía como para alcanzar la laguna a través de las ramblas. Cuando las precipitaciones no son suficientes, la evaporación de aguas ácidas durante periodos secos provoca la precipitación de eflorescencias de sulfatos que se enriquecen en elementos tóxicos (Alcolea-Rubio et al., 2023), y que se movilizan durante las tormentas más intensas, pudiendo alcanzar entonces al Mar Menor. Así, las precipitaciones torrenciales suelen generar pulsos contaminantes. Dado que la laguna costera es un sistema acumulativo, los metales van quedando retenidos en los sedimentos debido a las condiciones de salinidad y amortiguación de las aguas y a la gran cantidad de partículas con contenido metálico que se vierten a través de las ramblas (Marín-Guirao et al., 2007).

Algunos estudios indican altas concentraciones de metales pesados, tanto en la laguna como en los humedales de sus orillas, como consecuencia de los aportes, debidos en último término, a la existencia de todos los residuos mineros presentes (e.g.: García-García & Muñoz-Vera, 2015; Muñoz-Vera et al., 2016). Los estudios que abordan los procesos de captación de los elementos tóxicos por parte de los organismos vivos y la transferencia a través de las cadenas tróficas del ecosistema lagunar se abordan en otro capítulo.

2.4.3. Caracterización de los residuos mineros y áreas aledañas de las áreas de actuación

Las instalaciones de residuos mineros y superficies aledañas sobre las que se tiene previsto desarrollar labores de rehabilitación o restauración se han agrupado en nueve conjuntos de actuación. Todas ellas

se encuentran en cuencas hidrográficas de ramblas que vierten al Mar Menor (Miedo, Matildes, Beal y Carrasquilla). La **Figura 1** ofrece una visión de la distribución de los diferentes conjuntos de actuación.



Figura 1. Imagen que muestra la distribución de los diferentes conjuntos de actuación para la rehabilitación de residuos mineros y sus zonas aledañas.

Análisis de residuos y suelos

Se diseñó una campaña de muestreo específica para conocer mejor la naturaleza de los residuos y suelos cercanos, intentando tomar muestras en algunos lugares antes no investigados. Las muestras fueron tamizadas en campo con una malla de 2 mm. Los datos obtenidos se centran en las instalaciones incluidas en los inventarios del CN-IGME de residuos de procesamiento (año 2002) y de instalaciones (año 2022), a las que se ha sumado los gacheros presentes en las inmediaciones del colegio de La Unión y unas escombreras situadas en la cercanía de la presa conocida como Brunita.

Las valoraciones en cuanto a potencial contaminante de los residuos mineros y zonas aledañas sobre las que se pretende actuar, se han realizado a partir de las concentraciones totales obtenidas para los elementos arsénico (As), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plomo (Pb), vanadio (V) y cinc (Zn), que forman el conjunto de metales y metaloides contemplados en la Decisión de la Comisión 2009/359/CE de 30 de abril de 2009, a los que se sumó manganeso (Mn), antimonio (Sb), selenio (Se) y talio (Tl). El mercurio (Hg), que también forma parte de los elementos en los que se fija la mencionada norma, no ha sido considerado nunca como un elemento problemático en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. Por otro lado, se da por hecho que el contenido en hierro (Fe) ha de ser en general mayor en los residuos mineros que en los suelos naturales. Los niveles genéricos de referencia (NGR) de los suelos en la zona de estudio permiten establecer comparaciones y evaluar el potencial contaminante de los

residuos y sus zonas aledañas sobre el entorno. Dichos niveles se han extraído del estudio de Martínez-Sánchez et al. (2007), para la Sierra de Cartagena (Zona 3a). Los NGR son (mg/kg): As (15,56), Cd (0,54), Co (21,13), Cr (85,0), Cu (40,69), Ni (47,13), Pb (26,19), Sb (3,44), Se (1,04), Tl (0,58) y Zn (86,69). No se han establecido niveles de referencia en esta zona para los elementos Mo y V, por lo que han de ser valorados por comparación con otras referencias. Los NGR han sido empleados para comparar las medidas obtenidas y otras extraídas de la bibliografía, las cuales se recogen en la **Tabla 1**. Además, para proporcionar otras referencias a efectos comparativos, se han incorporado a las mencionadas tablas los límites superiores para materiales de relleno y recubrimiento propuestos por EPA-Victoria (2021), y los valores de las guías de calidad de sedimentos *SQG-High values* de ANZECC/ARMCANZ (2000), que señalan una alta probabilidad de efectos no deseados. Los primeros vienen a reconocer, al margen de otros requisitos, los contenidos máximos aceptables en materiales que, independientemente de su origen, pueden aceptarse para rellenar o recubrir residuos o zonas contaminadas. La idea es que, para aquellos residuos mineros que los cumplen, podría ser aceptable que permanecieran sin recubrir o tapar. Las guías de calidad de sedimentos tienen interés en la medida en que los procesos erosivos están convirtiendo los residuos mineros de la Sierra Minera en sedimentos. Dada la falta de guías de calidad en lo referente a Tl, se ha adoptado el valor de 1mg/kg como valor de referencia a efectos comparativos. Este valor es superior a lo que normalmente suele ser medido en suelos y sedimentos no contaminados (Belzile & Cheng, 2017).

	CUENCA VERTIENTE	AS	CD	CU	PB	SB	TL	ZN	ORIGEN DATOS
CONJUNTO 3									
Benzales	Miedo	76,5- 303	4- 40	56,1- 181	690- 2900	0,28- 0,82	5,9- 7,3	1740- 11700	
CONJUNTO 4									
Pocilgas	Miedo	51,6- 460	2,8- 5,3	28,6- 142	800- 2000	0,1- 0,46	3,4- 8,7	1070- 1960	
Presa Brunita	Miedo	121- 336	2,5- 4,2	23,1- 102	670- 1600	0,24- 0,65	5,6- 11	880- 1610	
Presa Brunita	Miedo	261	1,4	70,8	2562			1592	Fernández-Naranjo et al. (2020)
Presa Brunita	Miedo	287	2,7	101	2860	41,8		2250	Martín-Crespo et al. (2018)
Presa Brunita	Miedo	200			1800			2000	Conesa et al. (2007)
Escombreras Brunita	Miedo	21,9- 1380	1- 15		320- 6900		1,6- 10	598- 6630	
CONJUNTO 9									
Esparza y La Torrecica	Miedo	20,7- 442	1- 39		41- 7700		<LD- 8,6	276- 21400	
Esparza y La Torrecica	Miedo	219- 455	10- 54	80- 437	3867- 18738			3385- 13250	Navarro-Hervás et al. (2012)
Presas remodeladas	Miedo	77- 213	3,3- 10	27,6- 43,9	920- 2000	0,13- 0,75	2,5- 4	876- 4460	
Presas remodeladas	Miedo	265- 453	18- 322	69- 702	1160- 16957			1839- 53125	Navarro-Hervás et al. (2012)
CONJUNTO 2									
Gacheros colegio de La Unión	Miedo	53- 1250	1,6- 23	27,9- 365	1800- 15000	1,82- 670	1,1- 9,3	388- 7330	
CONJUNTO 6									
Cuesta de las Lajas	Miedo	219- 831	5,8- 26	46,8- 207	2100- 4000	0,28- 0,75	9,2- 19	1750- 7940	
Cuesta de las Lajas	Miedo	577	1,9	62,6	3742			1618	Fernandez-Naranjo et al. (2020)
Cuesta de las Lajas	Miedo		1,9- 17,4	53,1- 219	750- 13058			760- 9438	Acosta et al. (2014)
NGR regional de suelos (Martínez-Sánchez et al., 2007)		15,56	0,54	40,69	26,19	3,44	0,58	86,69	
Niveles admisibles fill material (EPA-Victoria 2011)		20	3	100	300			200	
Sedimentos SQG-High values ANZECC/ARM- CANZ (2000)		12	22	91	600	40		410	

	CUENCA VERTIENTE	AS	CD	CU	PB	SB	TL	ZN	ORIGEN DATOS
CONJUNTO 5									
Descargador I	Miedo - Matildes	1497	5,7	295	4575			1618	Fernández-Naranjo et al. (2020)
Descargador I	Miedo-Matildes			220-1400	1300-17000			4760-15700	Conesa et al. (2006)
Descargador I	Miedo-Matildes	1500	8,5	339	5200			5170	Conesa et al. (2008)
Descargador I	Miedo-Matildes	1128-1160	8,2-75,8	671-1348	4692-8310			5085-20087	Bes et al. (2014)
Descargador I y terrenos aledaños	Miedo-Matildes	142-929	6-25	17,4-234	3200-31000	0,55-460	6,6-18	3530-10600	
Descargador II	Matildes	51,6-460	2,8-5,3	63,3-201	800-2000	0,49-689	3,4-8,7	1070-1960	
Descargador II	Matildes	522	9,1	201	5902			3568	Fernández-Naranjo et al. (2020)
Instalaciones al Este del descargador II	Matildes	283-583	14-16	63,3-201	7900-16000	0,43-689	16-20	5000-10300	
CONJUNTO 7									
Encontrada	Matildes	183	10	29	4400	0,39	11	3500	
Encontrada	Matildes	96,6-186	1,4-21,6		397-6622	44,1-60,6		1180-4599	Datos CN-IGME no publicados
Encontrada	Matildes		9,1-30,5	38-465	2840-21272			2166-9813	Acosta et al. (2014)
Encontrada y Pajarillos	Matildes	369	20		7169			6063	Gómez-Ros et al. (2013)
Pajarillos	Matildes	34,1-161	4,8-29	22,5-43,4	3000-6300	0,32-34,1	4,7-16	1820-10600	
Pajarillos	Matildes	651	18,6	60,7	5931			5501	Fernández-Naranjo et al. (2020)
NGR regional de suelos (Martínez-Sánchez et al., 2007)		15,56	0,54	40,69	26,19	3,44	0,58	86,69	
Niveles admisibles fill material (EPA-Victoria 2011)		20	3	100	300			200	
Sedimentos SQG-High values ANZECC/ARM-CANZ (2000)		12	22	91	600	40		410	
CONJUNTO 1									
Estrecho de San Ginés	Beal	130	23	96,2	4600	0,96	8,4	9580	
San Agustín, Potasa	Beal	123-612	8,5-81	69,2-101	3599-5800	0,37-1,47	4,6-8,3	3680-26700	
Sur Llano del Beal	Beal	312-626	3,6-15	99,3-146	3400-7800	0,77-460	5-6,5	2030-6100	

	CUENCA VERTIENTE	AS	CD	CU	PB	SB	TL	ZN	ORIGEN DATOS
CONJUNTO 8									
Julio César	Beal	1540	12	330	55000	5,3	5,9	5510	
Pantano de la Rosa	Beal	37,9-528	2,4-17	12-72,3	2000-9500	0,34-0,84	1,5-8,1	1520-6690	
Pantano de la Rosa	Beal		31-37		7500-10000			13000-14000	Marguí et al. (2004)
Cabecera de la Rambla de Mendoza	Beal	48,5	13	32,1	3100	0,72	2,3	7060	
Cabecera del Barranco de Magreros	Carrasquilla	23,1-189	1-9,2	11,2-39,7	260-4700	0,25-0,74	1-4,6	348-4210	
Peña del Águila	Carrasquilla	23,3-613	2-13	10,5-194	1900	0,22	1,4	1850-7160	
Peña del Águila	Carrasquilla	141-152	14,6-22	35,4-43,6	2045-2964			5236-7565	Fernández-Naranjo et al. (2020)
Peña del Águila	Carrasquilla	360-941	22-58	94-129	4720-10800			8560-14100	Párraga-Aguado et al. (2014)
NGR regional de suelos (Martínez-Sánchez et al., 2007)		15,56	0,54	40,69	26,19	3,44	0,58	86,69	
Niveles admisibles fill material (EPA-Victoria 2011)		20	3	100	300			200	
Sedimentos SQG-High values ANZECC/ARM-CANZ (2000)		12	22	91	600	40		410	

Tabla 1. Datos de contenidos totales (mg/kg) de los principales elementos tóxicos medidos en muestras superficiales tomadas sobre residuos y terrenos aldeaños pertenecientes a los conjuntos de actuación, ordenados de Oeste a Este, sobre los que se tiene previsto actuar. Cuando no se dice nada sobre el origen de los datos debe entenderse que son datos nuevos obtenidos como parte de los trabajos previos al diseño de actuaciones. LD: límite de detección. En rojo los valores obtenidos que superan los Niveles Genéricos de Referencia (NGR, en negrita).

Otros parámetros de interés que se han analizado expresamente para conocer la naturaleza de los materiales presentes en las zonas de actuación han sido el pH y la conductividad eléctrica (CE) en suspensión de suelo 1:5 (residuo:agua). Lamentablemente, no se pudo realizar ningún ensayo para conocer la movilidad de los elementos potencialmente tóxicos, aunque la consulta de la bibliografía existente permite hacer también alguna valoración sobre este aspecto. En particular se ha consultado el trabajo de Arranz-González et al. (2019), en el que se aportan algunos datos sobre la fracción soluble

de los elementos citados más arriba, a los que se suma Al, como resultado de la aplicación del ensayo EN12457-2 (European Committee for Standardization, 2002).

Por último, también se dispuso de un informe elaborado por Nieto-Liñán (2023) sobre la capacidad de generación de acidez (Acid Base Accounting, ABA), empleando el método conocido como ABA modificado (Lawrence & Wang, 1997), mediante el cálculo de la capacidad neta de neutralización potencial (NNP, kg CO₃Ca/t material).

Análisis de aguas

También se han tenido en cuenta contenidos en elementos en muestras de agua, tomadas en puntos cercanos a las áreas de interés, aprovechando eventos de lluvia sucedidos a lo largo del año 2022. Los que se han considerado de más valor se re-

únen en la **Tabla 2**. Para valorarlos se han tenido en consideración las antiguas limitaciones sobre efluentes mineros de la Columbia Británica (Howie, 1980). Estos datos aportan información sobre la solubilidad de algunos de los elementos de mayor interés y se complementan con los datos de pH, CE y ABA.

	CUENCA VERTIENTE	MES	PH	CE	AL	AS	CD	CU	MN	PB	ZN
CONJUNTO 3											
Entrada Benzales	Miedo	Septiembre	3	2,54	100	0,01	0,17	0,57	37,2	0,22	41,6
Salida Benzales	Miedo	Septiembre	2,71	5,7	300	0,01	0,41	1,51	82,1	0,58	100
CONJUNTO 4											
Pocilgas	Miedo	Septiembre	2,44	12	1010	0,01	0,84	3,96	481	0,39	432
Escombreras Brunita	Miedo	Septiembre	3,02	1,3	21,9	0,01	0,04	0,24	6,9	0,37	11,1
Pie dique Este Brunita	Miedo	Septiembre	3,18	8	528	0,01	0,59	1,11	275	0,16	293
Pie dique Norte Brunita	Miedo	Noviembre	2,52	9,39	520	0,02	0,47	1,35	232	0,05	223
CONJUNTO 9											
Esparza y La Torrecica	Miedo	Septiembre	4,53	3	6,3	0,01	1,23	0,3	12,1	0,64	307
CONJUNTO 5											
Zona al pie del Descargador I	Miedo	Octubre	3,67	2,7	45	0,01	0,66	0,68	22,5	2,2	122
Zona al pie del Descargador I	Miedo	Octubre	2,86	3,42	114	0,01	0,73	1,56	15,5	2,33	158
Aguas arriba Descargador I	Matildes	Septiembre	6,43	0,75	0,05	0,01	0,06	0,01	4,9	0,05	2,42
Pie de Descargador II	Matildes	Septiembre	5,89	0,67	0,08	0,01	0,09	0,01	5,5	0,01	12,5
Aguas abajo Descargador II	Matildes	Mayo	4,7			0,05	1,49	0,08	229,3	1,61	290,4
Inferior efluentes mineros British Columbia (Howie, 1980)			6,5-8,5		0,5	0,1	0,01	0,05	0,1	0,05	0,2
Superior efluentes mineros British Columbia (Howie, 1980)			6,5-10		1	1	0,1	0,3	1	0,2	1

	CUENCA VERTIENTE	MES	PH	CE	AL	AS	CD	CU	MN	PB	ZN
CONJUNTO 8											
Cabecera de la rambla de Mendoza	Beal	Septiembre	2,98	13,1	101	0,01	2,05	1,46	49,8	0,05	470
Aguas abajo del Pantano de la Rosa	Beal	Septiembre	5,71	3,5	0,05	0,01	2,52	0,04	29,4	0,05	500
Cabecera del Barranco de Magreros	Carrasquilla	Septiembre	4,78	8,1	1,62	0,03	2,67	0,03	318	0,91	498
	Carrasquilla	Septiembre	6,56	5,9	0,12	0,02	0,16	0,01	21,1	0,05	29,4
Inferior efluentes mineros British Columbia (Howie, 1980)			6,5-8,5		0,5	0,1	0,01	0,05	0,1	0,05	0,2
Superior efluentes mineros British Columbia (Howie, 1980)			6,5-10		1	1	0,1	0,3	1	0,2	1

Tabla 2. Datos de pH, conductividad eléctrica (CE, dS/m) y concentración de los principales elementos tóxicos disueltos (mg/L) en muestras de agua obtenidas para este estudio. En rojo los valores obtenidos que incumplen el valor de pH o que superan los valores superiores del rango propuesto para efluentes mineros en *British Columbia*, que aparecen en negrita (Howie, 1980).

2.4.4. Concentraciones totales de elementos en los residuos y suelos estudiados

Elementos que no se consideran contaminantes por sus contenidos totales

Se ha comprobado que hay determinados elementos potencialmente tóxicos que no son motivo de preocupación por sus contenidos totales. Estos elementos son Co, Cr, Mo, Se y V. Todos los contenidos totales medidos de Co, Cr, Ni y Se resultaron inferiores a los NGR. Al no existir valores de NGR para Mo y V, los valores medidos se compararon con información obtenida en Alloway (2013), concluyendo que todos ellos se pueden considerar aceptables. Esto vendría a significar que, desde el punto de vista de la emisión de sedimentos o polvo, los residuos y materiales estudiados no se pueden considerar contaminantes por el contenido total en los elementos anteriormente mencionados.

Elementos que destacan por su elevada concentración total

Por el contrario, como se explica más adelante, hay una serie de elementos que destacan por su elevada concentración en gran parte de las muestras analizadas: As, Cd, Pb, Tl y Zn. También pueden llegar a ser importantes en algún punto las concentraciones de Cu y Mn. Los elementos As, Cd, Cu, Pb y Zn, han sido los más estudiados en residuos, suelos y sedimentos en diferentes trabajos publicados referentes a la Sierra Minera. También Sb ha sido destacado en algún trabajo como elemento a tener en cuenta. Sin embargo, hasta donde ha sido posible conocer, no existen trabajos que se hayan fijado en el Tl, aunque sí existe uno que destaca el efecto de dicho elemento sobre la especie *Bubo bubo* (Sánchez-Virosta et al., 2020).

La **Tabla 1** ofrece los datos de contenidos totales de los elementos que merecen mayor consideración, y que han sido obtenidos sobre muestras tomadas en las instalaciones de residuos mineros y sus zonas aledañas. Dichas tablas incluyen también información extraída de la bibliografía existente, así como las referencias fundamentales para enjuiciar el potencial contaminante asociado a las concentraciones de los diferentes elementos.

CONJUNTO 3. Benzales

Entre los conjuntos de actuación más occidentales, incluidos en la cuenca hidrográfica de la Rambla del Miedo, hay un paraje conocido como Benzales en el que existen dos instalaciones de residuos de flotación rodeadas de edificaciones habitadas y un área sin residuos en la que probablemente los hubo en otro tiempo. Las muestras tomadas sobre ellas y en sus inmediaciones arrojaron valores totales que superan sobradamente los NGR para los elementos As, Cd, Cu, Pb, Tl y Zn. Si se comparan con las otras referencias, As, Pb, Tl y Zn serían los elementos más preocupantes. Los contenidos en Mn fueron comparables a contenidos normales en suelos (794-2540 mg/kg).

CONJUNTO 4. Pocilgas, Brunita y escombreras en el entorno de Brunita

Un poco más al Sur, en las inmediaciones del límite occidental del cementerio de La Unión, existe un paraje conocido como Pocilgas en el que se encuentran dos instalaciones del inventario del CN-IGME del año 2002. La escorrentía de este conjunto vierte a la Rambla del Miedo. Las muestras tomadas sobre todo este grupo de instalaciones y en sus inmediaciones arrojaron valores totales que superan sobradamente los NGR para los elementos As, Cd, Cu, Pb, Tl y Zn. Comparados con las otras referencias, los valores de As, Pb, Tl y Zn son los que las superan en todas las muestras. En cuanto al Mn, el máximo valor medido fue 1380 mg/kg, que no es excesivo, aunque dado el pH ácido de los residuos la movilidad podría ser elevada.

La instalación denominada Brunita sufrió una rotura en el año 1978. Con posterioridad, se construyó un dique de materiales más gruesos y, recientemente se ha remodelado y recubierto parcialmente con estériles mineros diferentes. Esto ha podido afectar a la

caracterización de los materiales más superficiales, aunque, como se ve (**Tabla 1**), las concentraciones de As, Pb, Tl y Zn superaron, en todas las muestras, los correspondientes NGR. Si se comparan con las otras referencias se concluye que estos elementos son los más significativos. Los resultados obtenidos son, en general, coherentes con los aportados por Conesa et al. (2007), Martín-Crespo et al. (2018), Arranz-González et al. (2019) y Fernández-Naranjo et al. (2020, aunque ligeramente inferiores en Pb y Zn. En lo que se refiere a los contenidos totales de Mn, los valores medidos en las muestras tomadas sobre la instalación Brunita oscilaron entre 1600 y 2410, que son valores normales en suelos. Para esta instalación, existen datos de un sondeo publicados por Martínez-Pagán et al. (2011), los cuales muestran que, puntualmente, las capas superiores de la instalación podían contener concentraciones mayores de Cd, Pb y Zn que las comentadas con anterioridad. Además, del citado trabajo, y del de Martín-Crespo et al. (2018), se deduce que las concentraciones en profundidad pueden ser aún mayores, existiendo incluso zonas de enriquecimiento.

En las proximidades de la presa Brunita existen una serie de escombreras con apariencia heterogénea. Sorprende el elevado valor de Sb medido en una de las muestras (1389 mg/kg). En cualquier caso, casi todas las muestras presentaron una capacidad contaminante importante en lo que se refiere a As, Cd, Pb, Sb, Tl o Zn y, en la mayoría de los casos, a causa de varios de ellos, como se deduce de la comparación con los NGR y los valores de las otras referencias.

CONJUNTO 9. Cabezo Rajao, Esparza y la Torrecica

En el extremo más occidental de las zonas de actuación se encuentra un conjunto de presas mineras y sus zonas aledañas situadas al oeste del núcleo urbano de La Unión, en las cercanías del enclave minero conocido como Cabezo Rajao, sobre los parajes conocidos como Esparza, la Torrecica y en contacto con la ladera oriental del Cabezo Agudo. También se incluye un grupo de presas mineras al sur de la Torrecica que fueron remodeladas (extendidas), de tal modo que en el Inventario del CN-IGME del año 2002 se reconocieron como una única instalación. La escorrentía generada en todo este conjunto se concentra en el ramal más occidental de los que confluyen en la Rambla del Miedo. Aunque alguna de las muestras tiene contenidos aceptables en los elementos considerados, para la mayoría de ellas se

puede afirmar que el potencial contaminante por emisión de sedimentos es enorme, al sobrepasarse con mucho los NGR de As, Cd, Pb, Tl y Zn, y en algún caso también de Cu. En muestras cercanas a estas instalaciones, Navarro-Hervás et al. (2012) midieron valores muy elevados de estos elementos. En muchas de las muestras se sobrepasaron también las otras referencias para As, Pb, Tl y Zn. En cuanto al Mn, se midieron valores significativos, llegando a rebasar el valor de 6000 mg/kg en alguna muestra.

CONJUNTO 2. Colegio

También en la cuenca vertiente a la Rambla del Miedo, en el entorno del colegio de La Unión, se encuentran unas acumulaciones importantes de escorias de fundición (gachas). A pesar de su dureza y baja alterabilidad, llevan mucho tiempo de abandono, por lo que se ha podido producir una cierta meteorización, de modo que en algunas zonas se forma una matriz arenosa que puede acumular sales si está en posiciones por donde surge agua infiltrada. García-García (2004) señala que, durante los últimos 25 años se ha estado utilizando la gacha como árido para construcción de carreteras dentro de la comarca del Campo de Cartagena. En lo que se refiere a estos residuos, es muy importante recordar que los resultados analíticos corresponden a un material obtenido por tamizado en campo a 2 mm, que puede suponer un porcentaje estimado de 10%, como máximo. Los contenidos totales fueron muy elevados, en general, para los elementos As, Pb y Zn. También resultaron elevados los niveles de Cu, Cd, Sb y Tl en algunas muestras. En cuanto al Mn, los valores medidos oscilaron entre 590 y 1110 mg/kg, lo que puede ser aceptable. No existen, prácticamente, datos con los que poder comparar estos resultados. Alcolea-Rubio (2015) ofrece datos de contenidos totales de muestras compuestas de escorias tomadas en una zona muy próxima. Se encuentra cierta coherencia con los resultados ofrecidos en la Tabla 1, si bien sus muestras fueron molidas antes de ser analizadas: 683 mg/kg de As, 65 mg/kg de Cd, 268 mg/kg de Cu, 27400 mg/kg de Pb, 110 mg/kg de Sb, y 14720 mg/kg de Zn.

CONJUNTO 6. Cuesta de las Lajas

La zona de la Cuesta de las Lajas, presenta una instalación que fue incluida en los inventarios del CN-IGME de 2002 y 2022. El límite oriental se encuentra a

escasos metros de unos edificios habitados. Influye sobre el ramal central de los que forman parte de la cabecera de la Rambla del Miedo. En determinado momento, las superficies llanas fueron recubiertas con una mezcla de tierras y residuos de construcción y demolición, habiéndose producido una colonización natural de vegetación herbácea y arbustiva de bajo porte. Lo primero a destacar es el relativamente elevado contenido de Cu en una muestra (207 mg/kg), resultando muy superior a las del resto. Por la situación de la muestra debería ser un material de cobertura. La existencia de ese contenido elevado de Cu, junto a los elevados contenidos en As, Pb, Tl y Zn (Tabla 1), podría implicar un ascenso por capilaridad de los elementos, desde los residuos mineros. El resto de muestras parecen estar tomadas en residuo minero o mezcla. En todas ellas, las medidas obtenidas superaron los NGR para los elementos As, Cd, Pb, Tl y Zn. Para estos elementos, también se rebasaron casi siempre los valores de las otras referencias seleccionadas. En general, los datos son coherentes con los publicados por Fernández-Naranjo et al. (2020), referentes a una muestra tomada en zona de taludes sobre residuo minero, así como con los datos de Acosta et al. (2014), para muestras superficiales tomadas hasta una profundidad de 15 cm. Dichos autores, en muestras de sondeo, extraídas hasta una profundidad de 13 m, encontraron que los contenidos de estos elementos fueron normalmente superiores. En cuanto al Mn, los valores obtenidos fueron relativamente normales, a excepción una muestra con un contenido de 12500 mg/kg. Por su situación en el talud oriental, puede ser que se componga en una parte apreciable de sulfatos, lo que indicaría un elevado potencial de solubilización.

CONJUNTO 5. Descargador I y Descargador II

Hay que decir que parte de la escorrentía que afecta a la presa conocida como el Descargador I y su entorno vierte hacia la rambla del Miedo y otra parte vierte hacia la rambla de las Matildes (Figura 2). En lo que respecta a los contenidos totales, todas las muestras tomadas sobre la presa y su entorno presentaron contenidos muy elevados de As, Pb, Tl y Zn, y relativamente elevados de Cd (Tabla 1). Las concentraciones de todos ellos, en todas las muestras, estuvieron por encima de los correspondientes NGR y de los valores considerados como referencia. Existen también algunos valores muy altos de Sb (hasta 460 mg/kg). Bastantes muestras arrojaron, igualmente, contenidos muy elevados de Cu. Los contenidos en Cd, Cu y Pb obtenidos son coherentes con los publicados por Conesa et al.

(2006, 2008), Bes et al. (2014) y Fernández-Naranjo et al. (2020) para la mayoría de elementos. Sin embargo, en los dos primeros trabajos citados, las medidas de As y Zn fueron superiores, y en el de Fernández-Naranjo et al. (2020), el valor de Zn fue bastante inferior. En cuanto al Mn, se midieron contenidos entre 650 y 4100

mg/kg, que se pueden considerar normales en suelos, si bien, debido al pH muy ácido pueden dar problemas de toxicidad y liberación del elemento, de lo que se habla más adelante. Bes et al. (2014) también midieron entre 925 y 2953 mg/kg de Mn total en tres muestras tomadas sobre la presa el Descargador I.



Figura 2. Presa minera conocida como Descargador I desde una posición que permite apreciar el tamaño de la misma, con una altura máxima de 40 m.

La presa conocida como el Descargador II y los terrenos aledaños se sitúan en la cuenca de la rambla de las Matildes. De hecho, parte de sus residuos se han movilizado y recubren el propio cauce de la rambla, junto a otros procedentes de aguas arriba. En cuanto a los contenidos en elementos potencialmente tóxicos, en la instalación el Descargador II (**Tabla 1**), son de destacar los valores obtenidos de As, Cd, Pb, Tl y Zn. En todos los casos se superaron los NGR establecidos para estos elementos y los de las otras referencias para As, Pb, Tl y Zn. Los resultados obtenidos son, en general, muy coherentes con los aportados por Arranz-González et al. (2019) y Fernández-Naranjo et al. (2020), para una muestra compuesta superficial. Los contenidos en Mn total para las muestras tomadas en el Descargador II se movieron entre 921 y 1730 mg/kg, lo que no es excesivo. Sin embargo, como se confirma más abajo, la influencia del pH ácido puede ser muy importante desde el punto de vista de la movilidad de este elemento.

Al Este del Descargador II existen dos instalaciones que se incluyeron en el inventario del IGME del año

2002. En cuanto a los contenidos en elementos potencialmente tóxicos (**Tabla 1**), de nuevo destacan los contenidos en As, Cd, Pb, Tl y Zn. Todos los valores obtenidos para estos elementos fueron muy superiores a los NGR. Exceptuando Cd, también sobrepasaron los valores considerados en las otras referencias. El contenido en Cu de dos de las muestras también resultó relativamente alto (máximo de 201 mg/kg).

CONJUNTO 7. Encontrada y Pajarillos

Las presas conocidas como Encontrada y Pajarillos fueron inventariadas por el IGME en los años 2002 y 2022. La situada más al norte (Encontrada) fue incluida en el inventario con dos códigos, que fueron unificados en uno en el año 2022. En determinado momento, las superficies llanas de estas presas fueron recubiertas con suelos naturales arcillosos, y fueron plantados ejemplares de acacia, pino carrasco, ciprés y eucalipto, a los

que se han unido espontáneamente plantas herbáceas y arbustivas (Acosta et al., 2014). Según Navarro-Cano et al. (2017). Encontrada fue estabilizada a principios de los 90 mediante aporte de una capa de tierra de 30-50 cm la y la plantación en la plataforma superior de *Pinus halepensis*, *Tetraclinis articulata* y *Acacia* sp. La presencia de vegetación arbórea semejante, así como observaciones directas indican que esta solución fue aplicada también en Pajarillos. (Figura 3).



Figura 3. Imagen que muestra la parte superior de uno de los taludes de la presa minera conocida como Pajarillos. Puede observarse una capa de tierra arcillosa rojiza que recubre los residuos mineros.

En la presa denominada Encontrada sólo se tomó una muestra y en la conocida como Pajarillos se tomaron tres. Todos los valores obtenidos para los elementos As, Cd, Pb, Tl y Zn resultaron ser superiores a los NGR (Tabla 1). De la comparación con las otras referencias se deduce que los principales elementos contaminantes, por el contenido total, son As, Pb, Tl y Zn en las dos presas. Los resultados son acordes con los obtenidos por Fernández-Naranjo et al. (2020) para una muestra tomada en los taludes de Pajarillos. Es muy posible que dos de las muestras representen a recubrimientos afectados por ascenso capilar de elementos o con cierto nivel de mezcla con residuos.

Gómez-Ros et al. (2013) estudiaron la presa Encontrada, mediante la toma de muestras con una barrena, hasta una profundidad de 50 cm siguiendo un malla regular de puntos. Durante el muestreo intentaron distinguir la capa más superficial de recubrimiento, la capa inferior de recubrimiento en contacto con el residuo minero y la capa más superficial del propio residuo minero. En contra de lo esperado, la presa presentaba elevados niveles de elementos contaminantes en las capas más superficiales. Estos resultados vendrían

a confirmar lo comentado más arriba. Estos resultados fueron similares o algo inferiores a los datos de Acosta et al. (2014), para muestras superficiales tomadas hasta una profundidad de 15 cm en la presa Encontrada.

En una cárcava del talud occidental de la presa Encontrada, personal del IGME tomó algunas muestras en un perfil cuyos datos no han sido publicados. Los resultados analíticos más destacables de dichas muestras se han incorporado también a la Tabla 1. Se puede concluir que, en términos generales, los niveles de As, Cd, Pb, Sb, Tl y Zn pueden llegar a ser muy elevados en los residuos de ambas instalaciones. En cuanto a Mn, las muestras tomadas en estas presas contienen niveles muy elevados, especialmente en las que parecen representar más claramente los residuos mineros (entre 9650 y 19700 mg/kg). Esto, unido a la acidez de estos residuos, induce a pensar en que puede darse una importante movilidad del elemento, lo que más adelante se comenta.

CONJUNTO 1. Llano del Beal

En las inmediaciones del núcleo de población del Llano del Beal, en el límite Noroeste (áreas de San Agustín, Potasa), así como en la estación del ferrocarril de vía estrecha de Estrecho de San Ginés, existen unas acumulaciones de residuos que no han sido nunca inventariadas. Igualmente, existen algunas superficies semejantes a las descritas envolviendo el límite sur de la población. Se han incluido en el CONJUNTO 1 de actuaciones. En todas estas superficies destacaron los contenidos totales de As, Cd, Pb, Tl, Zn y, en menor medida, de Cu. (Tabla 1). Los valores obtenidos para estos elementos en bastantes de las muestras superaron con mucho los NGR y los valores de las referencias seleccionadas. En lo referente a Mn, estas muestras presentaron contenidos que se pueden considerar normales en suelos (1120-4670 mg/kg), excepto en una de ellas, con 13300 mg/kg. La posibilidad de encontrar valores tan elevados de Mn, unido al carácter ácido de las muestras, induce a esperar una elevada movilización de este elemento.

CONJUNTO 8. Cabecera de la Rambla de Mendoza y del Barranco de Magreros

Al sur de la población del Llano del Beal, ascendiendo por el cauce de la Rambla de Mendoza, afluente de la Rambla del Beal, existen diversas instalaciones de resi-

duos mineros y áreas alteradas de diversa naturaleza. Se han incluido en el llamado CONJUNTO 8 de actuaciones, el cual se continúa, pasando a través de la divisoria de aguas, en la cabecera de la Rambla de la Carrasquilla.

En esta zona es destacable una pequeña acumulación de residuos, aparentemente de gravimetría, no inventariada por el IGME y conocida como Julio César. En la **Tabla 1** se ofrecen los resultados de una muestra tomada sobre ella. Destaca por representar al material más potencialmente contaminante encontrado, en lo que se refiere a contenidos totales de As y Pb. Ya alcanzando la cabecera de la rambla, hay una serie de instalaciones y áreas aledañas dominadas por residuos de flotación, aunque también se han reconocido residuos de gravimetría (García-García et al., 2022). Incluye un depósito del inventario del IGME del año 2002 conocido también como Pantano de la Rosa, así como una pequeña extensión situada al sur. La divisoria de aguas entre las cuencas del Beal y Carrasquilla pasaría muy cerca de la cola de esta instalación.

La muestra probablemente más representativa del Pantano Rosa arrojó unos contenidos muy elevados de As, Cd, Pb, Tl y Zn (**Tabla 1**). Otras dos muestras dieron contenidos muy elevados de Pb y Zn, y relativamente elevados As, Cd y Tl. Los elementos Pb, Tl y Zn, son los que más destacan cuando se comparan con los valores usados como referencia. Las concentraciones totales de Mn medidas en estas muestras se pueden considerar como relativamente normales en suelos (2110-4400 mg/kg). Marguí et al. (2004) midieron contenidos extraíbles con agua regia (pseudototales) de Cd, Pb y Zn en una muestra tomada en el Pantano Rosa **Tabla 1**. Los valores obtenidos resultan bastante elevados, si se comparan con los obtenidos para este estudio.

En la cabecera del Barranco de Magreros, ramal afluente de la Rambla de la Carrasquilla se encuen-

tran unas instalaciones y áreas afectadas por residuos mineros que representan una cierta continuidad con respecto a las situadas en la cabecera de la Rambla de Mendoza, una vez que se traspasa la divisoria de aguas. Tres instalaciones aparecían en el inventario del CN-IGME del año 2002. Dos de ellas, las más cercanas a la divisoria de aguas (cabecera del Barranco de Magreros) se agruparon en una en el inventario de 2022 y la tercera, también conocida como pantano Peña del Águila, pasó a tener un código nuevo.

Los contenidos medidos en las muestras correspondientes a la instalación de la cabecera del Barranco de Magreros y los terrenos aledaños situados en cola de la misma, así como los de las muestras del conocido como Pantano Mercader, superaron con creces los NGR de As, Cd, Pb, Tl y Zn. Además, en dos de ellas, se rebasa también el NGR de Cu. Comparando con las otras referencias, los contenidos que más destacan son los de As, Pb y Zn. Los resultados obtenidos concuerdan bastante bien con los aportados por Fernández-Naranjo et al. (2020), para muestras compuestas superficiales tomadas en estas instalaciones. Por otro lado, Párraga-Aguado et al. (2014) no encontraron diferencias significativas entre los contenidos de elementos medidos en muestras de residuos tomadas en zonas desnudas de vegetación, islas de fertilidad o rizosferas, situadas en las instalaciones de la cabecera del Barranco de Magreros y la presa Mercader. Esto vendría a significar que, a pesar de las elevadas concentraciones totales en elementos potencialmente tóxicos, la movilidad puede ser baja o la vegetación posee mecanismos de resistencia a las mismas. Sus resultados también se han incorporado a la Tabla 1. En lo referente a Mn, algunas muestras proporcionaron contenidos que se pueden considerar normales para suelos (entre 751 y 2420 mg/kg), mientras que otras arrojaron valores elevados (entre 5560 y 7500 mg/kg).

2.4.5. Contaminación por procesos de lixiviación

Ya se ha mencionado que no fue posible hacer valoraciones directas de la solubilización de elementos potencialmente tóxicos. Sin embargo, ha sido posible revisar algunas informaciones publicadas que, junto a algunos datos de capacidad de generación de acidez y al análisis de muestras de agua tomadas en 2022 (**Tabla 2**), pueden permitir valorar en cierta medida esta problemática. Los resultados analíticos de muestras de agua se han contrastado con los límites superiores para efluentes mineros de la Columbia Británica (Howie, 1980), que también se han incor-

porado a la citada tabla como referencia a efectos comparativos.

CONJUNTO 3. Benzales

Como se ha dicho, en el paraje conocido como Benzales, existen dos instalaciones de residuos de flotación rodeadas de edificaciones habitadas. Son instalacio-

nes que difieren ligeramente entre sí en el color. Se ha podido comprobar que la más occidental es probablemente generadora de acidez (NNP=-13,76 kg CO₃Ca/t), mientras que la otra no lo es (NNP=41,27 kg CO₃Ca/t) (Nieto-Liñán, 2023). Los datos de pH indicaron en esta zona que los materiales se pueden considerar entre ligeramente ácidos a ultra-ácidos, con conductividades eléctricas medidas en suspensión muy elevadas. Se dispuso de una muestra de agua tomada prácticamente a la entrada de esta zona, que debe estar influida por las escorrentías procedentes del entorno de Brunita, del cementerio de La Unión y de la zona de Pocilgas. Dicha muestra era de carácter ácido y de elevada CE. Los elementos más destacables fueron Al, Mn y Zn. Existe otra muestra tomada en la misma fecha que la anterior y situada aguas abajo de la zona de Benzales, la cual debería mostrar la influencia de los residuos presentes en ella. Se observa (Tabla 2) que todos los elementos más destacables incrementan su concentración con respecto a la primera muestra, al tiempo que se superan muy sobradamente los valores de referencia.

CONJUNTO 4. Pocilgas, Brunita y escombreras en el entorno de Brunita

En la zona del Pocilgas, al Oeste del cementerio de La Unión, se ha comprobado que los residuos almacenados en estas instalaciones, así como algunas muestras tomadas en sus inmediaciones, son generadores de acidez, con valores de NNP entre -22,55 y -359,75 kg CO₃Ca/t (Nieto-Liñán, 2023). Las muestras de residuos resultaron entre moderadamente salinas y extremadamente salinas. Con estas características, se puede inferir que este tipo de residuos mineros son muy similares a los almacenados en la instalación conocida como Brunita, de la que se habla a continuación. Una muestra de agua tomada en septiembre al pie del dique de la instalación más septentrional resultó de pH muy ácido, elevada CE y alto contenido en sulfatos. Los resultados de concentración de Al, Cd, Cu, Mn y Zn son los que más sobrepasan los valores de referencia (Tabla 2).

En las muestras tomadas sobre la superficie de la presa Brunita dominan las de carácter fuertemente salino a extremadamente salino, y son de carácter extremadamente ácido o ultra-ácido. Se sabe por el trabajo de Martín-Crespo et al. (2018) que los residuos profundos son muy ricos en pirita, lo que los convertiría en altamente generadores de acidez potencial y explica la acidez actual de los más superficiales debido a procesos de oxidación. En cuanto al potencial de lixiviación

de elementos potencialmente tóxicos, existe información publicada por Arranz et al. (2019) que muestra los contenidos liberados con el ensayo de lixiviación estandarizado citado más arriba, aplicado a una muestra compuesta superficial. De todos los resultados obtenidos destacaron las concentraciones de Cd (93,4 µg/L), Pb (824 µg/L) y muy especialmente Al (55,9 mg/L) y Zn (18,8 mg/L). Además, para esta muestra se conoce que la concentración de Mn en el lixiviado fue de 35,39 mg/L. El efecto contaminante de los residuos mineros de la instalación Brunita se hace sentir sobre las aguas superficiales, como se ha podido constatar también (Tabla 2), especialmente en lo referente a Al, Mn y Zn, y, en menor medida, de Cd y Cu.

En las escombreras del entorno cercano a la presa Brunita, los valores medidos de pH oscilaron entre 2,6 y 5,9. La mayor parte de las muestras tomadas se pueden calificar como ultra-ácidas, salvo algunas que presentaron una acidez menor. A la vista de los valores de CE, todas resultaron extremadamente salinas y, especialmente la muestra más ácida, que proporcionó una CE extraordinaria de 28100 µS/cm (1:5). Parece probable que esta muestra fuera tomada en un punto deprimido cargado de precipitados de sales. Existe una muestra de agua tomada aproximadamente al pie de estas escombreras en el punto de menor cota. Resulta lógico pensar que el efecto de los residuos mineros se hace notar sobre las aguas superficiales, aunque no se dispone de una muestra tomada aguas arriba, especialmente en lo que se refiere a Al, Mn, Pb y Zn.

CONJUNTO 9. Cabezo Rajao, Esparza y la Torrecica

En las instalaciones más próximas al llamado Cabezo los valores de CE medidos en los residuos permiten afirmar que la mayoría de los materiales superficiales presentes son extremadamente salinos. Esto es debido a la presencia de productos de oxidación de sulfuros. Sin embargo, el contenido en minerales neutralizantes en los residuos, debía ser lo suficientemente alto en origen como para que predominen, en estas muestras superficiales, valores de pH que van de ligeramente ácido a ligeramente alcalino. Sin embargo, los materiales de las presas más cercanas al Cabezo Rajao son mayoritariamente de carácter ácido, con valores de CE que las califican como muy fuertemente o extraordinariamente salinas, coincidiendo la máxima CE con el mínimo valor de pH, al contrario de lo que ocurre en suelos naturales. Otro agrupamiento de instalaciones situado en las inmediaciones del anterior es el que se ha denominado la Torrecica. Aquí destaca con claridad una mues-

tra con un valor de pH de 2,8 (extremadamente ácido) y una CE extraordinaria de 12590 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (1:5). Muy probablemente se trate de una zona deprimida enriquecida en eflorescencias de sulfatos, lo que determina también su extraordinario contenido total en elementos contaminantes. El resto de las muestras puede considerarse entre fuertemente ácidas y ligeramente ácidas, así como extremadamente salinas. También en la zona de la Torrecica, más hacia las zonas urbanizadas de La Unión se encuentran unas instalaciones cuyas muestras pueden clasificarse entre ligeramente ácidas y ligeramente alcalinas, así como muy fuertemente salinas. Se dispone de una muestra de agua que se sitúa en un punto de acumulación de escorrentía cercano a los taludes orientados al norte del conjunto conocido como la Torrecica (Tabla 2). En la mencionada muestra se rebasan con creces los valores usados como referencia de Al, Cd, Pb, Mn y Zn. No es posible saber en qué medida esto podría ser representativo de todos los residuos de esta zona o si es sólo consecuencia de circunstancias puntuales.

Navarro et al. (2008) aportan algunos datos de muestras de agua tomadas en esta zona ligadas a un evento de lluvia. Cuatro de ellas se situarían muy próximas a la muestra a la que se ha comentado antes. Los datos obtenidos mostraron gran variabilidad, con pH muy variable y muy elevada conductividad eléctrica. Destacaron los valores elevados de Pb en alguna muestra y los valores altos de Cd, que llegó a ser extraordinariamente alto en una de ellas. El Cu resultó muy elevado en la de menor pH. En términos generales, los valores medidos de Cd, Mn y Zn disueltos resultaron enormemente elevados.

En cuanto a las presas mineras al sur de la Torrecica que fueron remodeladas (extendidas), según los valores de pH obtenidos, las muestras van de ligeramente ácidas a ligeramente alcalinas. Navarro et al. (2008, 2012) obtuvieron un valor de pH de 4 en un punto del dique de esta instalación, mientras que encontraron valores superiores a 8 en otros dos puntos de la zona más occidental de la instalación. Los valores de CE son característicos de materiales muy fuertemente salinos en dos muestras de esta instalación, mientras que otras no lo son tanto. Navarro et al. (2008, 2012) obtuvieron valores de CE también dispares en tres muestras de esta instalación (4, 8,9 y 17,5 dS/m, en suspensiones 1:5) aunque todas las medidas indican una fuerte salinización. Por la posición de las muestras no es posible explicar porque ocurre esto, aunque tampoco es raro en este tipo de materiales. Sin embargo, cabe pensar que la muestra más ácida y de mayor salinidad que reportan Navarro et al. (2008, 2012) debía contener sulfatos ácidos. De hecho, en muestras

tomadas netamente sobre los residuos de esta instalación, el valor de NNP resultó entre 135,7 y 381,5 kg $\text{CO}_3\text{Ca}/\text{t}$ (Nieto-Liñán, 2023), lo que significa que tendrían una capacidad de neutralización muy elevada y explica los valores de pH moderados. En cuanto a la movilidad de los elementos, lamentablemente, tampoco existe información de ensayos de lixiviación para esta instalación. Sin embargo, en el trabajo de Navarro et al. (2008), se da información de una muestra que, aunque no se pueda asegurar totalmente, podría estar influida por escorrentías procedentes del dique occidental de la instalación. De ella destacaron un valor elevado de Pb y contenidos extraordinariamente elevados de Cd, Mn y Zn.

CONJUNTO 2. Colegio

En lo relativo a las escorias de fundición que circundan el colegio de La Unión, no es mucho lo que se puede decir sobre lixiviación de elementos. Recordando que los análisis se refieren a la fracción inferior a 2 mm, existe una muestra que se puede considerar extremadamente salina y ultra-ácida (pH de 2,5), en la que probablemente existieran importantes cantidades de sulfatos ácidos precipitados. Otra muestra resultó ser fuertemente salina y moderadamente ácida. Es muy posible que esta muestra contuviera también sulfatos, aunque en menor proporción que la anterior. Las otras muestras resultaron ser no salinas y neutras. En cuanto a la posible movilidad o solubilidad de los elementos, no se ha podido encontrar ninguna información para estos materiales. Algunos trabajos consideran las fases de alteración en escorias como un elemento de riesgo por la liberación de elementos metálicos ligados a procesos de lixiviación en épocas de lluvia (Lottermoser, 2005; Piatak et al., 2004). Teniendo esto en cuenta, sería interesante conocer la mineralogía presente en fracciones finas y medir directamente la solubilización de elementos de esas fases secundarias, así como la evaluación más detallada de la proporción en volumen o masa que suponen.

CONJUNTO 6. Cuesta de las Lajas

Las muestras obtenidas en la instalación de la Cuesta de las Lajas ofrecen valores de pH bajos, de moderadamente ácidos a fuertemente ácidos. Los valores de conductividad eléctrica son elevados. Los valores de NNP se mueven en la zona de incertidumbre, tanto para los materiales de recubrimiento como para

los depositados al pie de la presa (Nieto-Liñan, 2023). El valor máximo de CE coincide con el valor mínimo de pH, en una muestra tomada en zona de taludes. Una muestra igualmente tomada en estos taludes, claramente sobre residuo minero con importante presencia de eflorescencias, arrojó un valor de pH de 2,76 (en proporción 1:1) (Fernández-Naranjo et al., 2020). La **Figura 4** muestra la formación de eflorescencia salinas en los taludes de esta instalación. En esta instalación, Acosta et al. (2014) tomaron muestras superficiales siguiendo un mallado regular hasta una profundidad de 15 cm. Dichas muestras superficiales serían representativas del material de cobertura empleado en la presa. Encontraron que el pH en proporción 1:1 fue de 7,66 de media (ligera-mente alcalino), y la CE en proporción 1:5 de 1,34 dS/m, lo que supondría, si se considera que el material es franco-arenoso, que se pueda calificar como fuertemen-

te salino. En muestras de sondeo extraídas hasta una profundidad de 13 m la salinidad aumentaba considerablemente y también la acidez, con un mínimo valor de pH de 3,94 (extremadamente ácido). Existe información no publicada de una muestra tomada en los taludes de esta instalación que fue analizada aplicando el ensayo de lixiviación estandarizado EN 12457-2. Entre los resultados destacaron las concentraciones de Cd (110 µg/L), Pb (1127 µg/L) y, muy especialmente, Al (71 mg/L), Mn (48,16 mg/L) y Zn (37,98 mg/L), que se pueden considerar extraordinariamente elevadas. Acosta et al. (2014) encontraron que las muestras superficiales tomadas en la cobertura de la presa presentaban unos contenidos de Cd y Pb solubles que se pueden considerar relativamente elevados. Sin embargo, en muestras profundas, correspondientes a residuos mineros, llegaron a ser importantes los contenidos solubles de Cd, Pb y Zn.



Figura 4. Presa minera de la Cuesta de las Lajas, observándose un talud de perfil recubierto de tierras y vegetación y otro, de frente, con profusión de sales blanquecinas de sulfatos.

CONJUNTO 5. Descargador I y Descargador II

En lo referente a la instalación Descargador I y el entorno cercano, los valores obtenidos de pH y CE ofrecen una heterogeneidad grande, pero se intuye que reflejan en mayor o menor medida la influencia de la presa sobre los diferentes puntos. Aparentemente, el valor de pH es menor cuanto mayor es el aporte de

sedimentos emitidos desde la presa y depositados en función de la microtopografía. Ocurre que las muestras de las inmediaciones resultan ligeramente generadoras de acidez, aunque en la zona de incertidumbre, a pesar de ser materiales muy oxidados (Nieto-Liñán, 2023). El grado de alteración y la evaporación determina la presencia de sales (sulfatos, fundamentalmente) lo que implica mayor CE. El máximo valor de CE (6990 µS/cm, 1:5) se da en una muestra extremadamente salina y de pH ultra-ácido (2,9), que fue tomada en un di-

que de la presa. El resto fueron siempre ácidas y salinas en mayor o menor grado. Arranz-González et al. (2019), encontraron que una muestra compuesta superficial, en teoría representativa de la superficie de la presa, era extremadamente ácida, con un valor de pH (1:1) de 3,58. Los valores medidos sobre extractos de saturación por Conesa et al. (2006, 2008) para esta presa, fueron igualmente considerados por dichos autores como extremadamente ácidos y fuertemente salinos. También en esta presa, para tres puntos de muestreo distintos, Bes et al. (2014) obtuvieron valores de pH medidos en pasta saturada entre 3,14 y 3,30. De igual modo, observaron que la CE en proporción 1:5 (suelo/agua) fue bastante alta. En cuanto a la movilidad de los elementos, los valores obtenidos para algunos de ellos por Arranz-González et al. (2019), mediante el ensayo de lixiviación EN 12457-2 aplicado a una muestra compuesta superficial tomada sobre esta presa, estaban entre los valores más altos de todas las instalaciones inventariadas en España. En ella, el valor obtenido de Zn en el lixiviado resultó extraordinariamente elevado, siendo también de gran importancia los cationes Al, Cd, Mn y Pb. Previsiblemente, todos los materiales de zonas aledañas, que han recibido la influencia de esta presa a través de procesos de lixiviación o erosión, ofrecerán concentraciones solubles elevadas de los mencionados elementos. En la misma línea, Bes et al. (2014) analizaron muestras de agua de poro tomadas en tres puntos de la presa, obteniendo valores extraordinariamente altos de Cd (hasta 87,6 mg/L), Mn (hasta 2999 mg/L), y sobre todo de Zn (hasta 12086 mg/L).

En las zonas situadas al pie de la presa, vertiendo hacia la Rambla del Miedo, se pudieron tomar muestras de agua (Tabla 2). Los elementos disueltos más importantes fueron Al, Cd, Mn, Pb y especialmente Zn, apreciándose una cierta atenuación desde la situada a mayor cota hasta la más inferior. Igualmente, se tomaron muestras de agua asociadas a un evento de lluvias en un punto situado prácticamente al pie de la presa, aunque todavía sin una importante influencia de la misma, la mayoría de contenidos en elementos disueltos fueron aceptables. Sólo se superaron los valores de Mn y Zn empleados como referencia. Para la misma fecha de muestreo, en un punto a la salida de la zona hacia la Rambla de las Matildes, los valores de Al, Cd, Mn, Pb y Zn superaron con creces los valores usados como referencia y permiten pensar que las aguas de escorrentía que escurran por la presa y sus terrenos aledaños se cargarán muy probablemente de estos elementos en solución.

Los valores obtenidos de pH y CE de las muestras tomadas en la instalación el Descargador II y en sus inmediaciones fueron muy uniformes. Las medidas de

pH estuvieron siempre cerca del límite entre la calificación de extremadamente ácido y ultra-ácido (entre 3,3 y 3,6). Además, las muestras se pueden calificar como muy fuertemente salinas. La Figura 5 muestra el aspecto que ofrece la superficie de la presa en verano, con abundantes sales de sulfatos ácidos que explican la elevada salinidad y acidez de las muestras superficiales. Los valores contenidos son coherentes con los publicados por Arranz González et al. (2019), para una muestra compuesta superficial tomada en esta instalación, con un pH de 3,7, en proporción 1:1, y una CE de 3 dS/m para una dilución 1:10.

En cuanto a la movilidad de los elementos, los valores aportados por Arranz-González et al. (2019) para algunos de ellos mediante el ensayo de lixiviación EN 12457, aplicado a una muestra compuesta superficial tomada sobre esta presa, están igualmente entre los valores más altos de todas las instalaciones inventariadas en España. En ella, el contenido de Zn en el lixiviado resultó extraordinariamente elevado, siendo también de gran importancia los cationes Al, Cd, Mn y Pb. Previsiblemente, todos los materiales de zonas aledañas, que han recibido la influencia de esta presa a través de procesos de lixiviación o erosión, ofrecerán también concentraciones solubles elevadas de los mencionados elementos.



Figura 5. Presa minera conocida como Descargador II. Se observan abundantes sales blanquecinas de sulfatos altamente solubles formadas por evaporación y ascenso capilar en la época estival.

En mayo de 2023 se tomó una muestra de agua asociada a un evento de lluvias. Dicha muestra, puede representar la influencia del Descargador II y las presas cercanas, así como de las zonas aledañas a las

mismas, amén de lo que pueda venir desde la zona del Descargador I, situada aguas arriba (Tabla 2). Los elementos disueltos analizados más importantes fueron Cd, Mn, Pb y especialmente, Zn. Muy probablemente el Al, que no fue medido, sea también importante en este caso.

CONJUNTO 7. Encontrada y Pajarillos

Ya se mencionó que en la presa Encontrada solo fue tomada una muestra. Esta muestra resultó ser de carácter neutro (pH de 7,2) con una conductividad elevada (1205 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 1:5). Es posible que esta muestra represente más a los materiales de recubrimiento que a los residuos mineros. En la instalación conocida como Pajarillos, se tomó una muestra que puede representar igualmente materiales de recubrimiento, no salinos y de pH neutro. Sin embargo, las otras muestras obtenidas aquí, que también son neutras, son extremadamente salinas. Probablemente proceden de zonas de taludes. En una muestra compuesta tomada en la zona de taludes occidentales de la presa Pajarillos, se midió un pH de 6,19 en proporción 1:1, es decir, ligeramente ácido (Fernández-Naranjo et al., 2020). Existen algunos datos obtenidos por personal del IGME, no publicados, sobre la lixiviabilidad de los elementos en muestras tomadas en estas instalaciones. Se dispuso también de medidas obtenidas para las muestras que fueron tomadas en los taludes occidentales de Encontrada y de Pajarillos, mediante el ensayo de lixiviación EN 12457-2. En Encontrada los resultados fueron: un máximo de 0,012 mg/L de Al, 0,136 mg/L de Cd, 0,468 mg/L de Pb, 8,53 mg/L de Mn, y 9,98 mg/L de Zn. En Pajarillos: 0,33 mg/L de Al, 0,056 mg/L de Cd, 11,2 mg/L de Mn, 0,025 mg/L de Pb, y 2,29 mg/L de Zn. Se puede decir que los elementos que más pueden afectar a las aguas que entren en contacto con estos residuos serán Cd y Zn, aunque si se compara con los resultados obtenidos con este tipo de ensayos en los residuos de la zona del Descargador I y II, estos residuos parecen ser menos contaminantes.

CONJUNTO 1. Llano del Beal

En cuanto a los residuos acumulados en la estación de Estrecho de San Ginés y en las áreas limítrofes con la población del Llano del Beal, todas vertientes a la Rambla del Beal, las muestras obtenidas fueron de carácter extremadamente ácido (pH entre 3,8 y 3,9), a excepción de una, que resultó moderadamen-

te ácida (pH de 5,8). Los valores de CE las califican entre moderadamente salinas y extraordinariamente salinas. Lamentablemente, no existen datos sobre elementos solubles en las muestras tomadas en estas áreas, ni muestras de agua que, por su situación, permitan inferir algo en relación con la posible disolución de elementos tóxicos. Sin embargo, si existen algunos datos de capacidad de generación de acidez para la zona noroccidental y los residuos de la estación, en las que se midieron valores de NNP entre 142,9 y 280,9 kg $\text{CO}_3\text{Ca}/\text{t}$ (Nieto-Liñán, 2023), lo que significa que tendrían una capacidad de neutralización elevada. En las áreas colindantes por el sur, la capacidad de neutralización fue muy variable con un mínimo de NNP de -38,65 kg $\text{CO}_3\text{Ca}/\text{t}$ y un máximo de NNP de 372,87 kg $\text{CO}_3\text{Ca}/\text{t}$.

CONJUNTO 8. Cabecera de la Rambla de Mendoza y del Barranco de Magreros

La pequeña acumulación de residuos (o mineral) que se ha denominado Julio César posee un pH de 3,1 (ultra-ácido) y una conductividad eléctrica de 3300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (1:5). No se realizaron pruebas de lixiviación, aunque, por los contenidos tan elevados de elementos potencialmente tóxicos y la elevada acidez, es previsible que se liberen gran cantidad de elementos disueltos cuando entren en contacto con el agua.

En la cabecera de la Rambla de Mendoza, incluyendo el llamado Pantano de la Rosa, los valores de pH se mueven entre ligeramente alcalino y fuertemente alcalino (7,5 a 8,5). La CE, salvo en una muestra que resultó muy fuertemente salina, califica a las muestras como no salinas. La muestra más ácida y salina fue tomada en los diques del Pantano de la Rosa, donde es esperable que la acidificación sea mayor, por lo que parece que los residuos de esta instalación deben ser en general alcalinos. Existe algo de información relativa a una muestra tomada en esta instalación proporcionada por Marguí et al. (2004), aplicando el método de lixiviación DIN-38414-S4 (DIN-NORMEN, 1984), que se puede considerar equivalente al EN 12457-2. La aplicación de este ensayo a la citada muestra dio como resultado que los niveles solubles de Cd, Pb y Zn estuvieron todos por debajo del límite de detección. Marguí et al. (2004) también aplicaron a la muestra el ensayo TCLP (*Toxic Characteristic Leaching Procedure*), o método EPA-1311 (USEPA, 1994), conocido también como Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad. Los valores obtenidos fueron: 0,79 mg/L de Cd, 2,6

mg/L de Pb y 127 mg/L de Zn. Todos ellos se pueden calificar como bajos o aceptables. Considerando que este método tiene más capacidad de extracción que el agua desionizada para residuos no excesivamente ácidos, parece que la movilidad de estos elementos puede ser baja en esta instalación.

En esta zona se tomaron muestras de agua, asociadas a un evento de lluvias a final de verano (Tabla 2), en un punto situado prácticamente al inicio de la rambla, en una zona en la que García-García et al. (2022) identifican unos residuos de gravimetría en la margen izquierda. La mayoría de contenidos en elementos disueltos fueron muy elevados, con un pH de 2,98 y una CE de 13,1 dS/m, y permiten pensar que existe algún tipo de material cercano con gran capacidad contaminante. Sin embargo, considerando datos de aguas tomadas en diciembre de 2022, que dan resultados más bajos que las tomadas en septiembre, se observó que, entre este punto y otro situado al pie de los taludes del Pantano de la Rosa se produce un descenso de los contenidos disueltos de Mn y Zn, con un ligero aumento de pH y descenso significativo de la CE, lo que indicaría una capacidad de atenuación importante en un recorrido muy corto.

En cuanto a los materiales presentes en la cabecera del Barranco de Magreros (Cuenca de la Carrasquilla), incluido el Pantano Mercader (Figura 6), los valores de pH obtenidos permiten calificar a todas las muestras como neutras o moderadamente alcalinas (entre 7 y 8,4). Además, se pueden calificar como no salinas o ligeramente salinas, a excepción una. Fernández-Naranjo et al (2020), en muestras compuestas superficiales tomadas en la mencionada instalación y la situada en contacto con ella por el Noroeste, encontraron unos valores de pH en proporción 1:1 de 7,6 y 7,54 respectivamente, lo que es coherente con los resultados anteriores. Párraga-Aguado et al. (2014) midieron valores de pH, en proporción 1:5, que oscilaron entre 6,4 y 7,5 sobre muestras tomadas en las mismas instalaciones, aunque midieron valores de CE muy superiores (entre 1,7 y 3,4 dS/m en proporción 1:5), lo que puede ser achacable a una diferente época de muestreo.

En cuanto a la movilidad de los elementos, el IGME posee algunos datos analíticos no publicados obtenidos mediante el ensayo de lixiviación EN 12457-2, aplicado a una muestra compuesta superficial tomada sobre la instalación cercana a Mercader. Los valores obtenidos fueron (en µg/L): <1000 de Al, 0,64 de As, 5,43 de Cd, 116 de Mn, 0,4 de Pb, y 614 de Zn. Puede decirse que son, en general, sorprendentemente bajos. En el trabajo de Párraga-Aguado et al. (2014) también se

aportan datos de elementos solubles en muestras de residuos tomadas en zonas desnudas de vegetación, islas de fertilidad o rizosferas, situadas en estas instalaciones. Los valores obtenidos confirman la muy baja solubilidad de los elementos más significativos.



Figura 6. Fotografía de la presa minera conocida como Mercader en el año 2011. En la actualidad se encuentra sometida a experiencias de implantación de vegetación ejecutadas con posterioridad.

La Tabla 2 ofrece datos de muestras de agua asociadas a un evento de lluvias. En un punto situado prácticamente en la cabecera de la Rambla de Magreros, con un pH de 4,78, la mayoría de contenidos en elementos disueltos fueron bastante elevados para Al, Cd, Mn y Zn. Sin embargo, para la misma fecha de muestreo y aguas abajo del anterior (en un punto próximo a la base de la presa Peña del Águila), se observó que sólo son destacables los valores superiores de Cd y Zn, apreciándose un descenso generalizado de todos los elementos medidos. Esto podría significar que, existiendo materiales bastante contaminantes en cabecera, es probable que estén muy localizados en las cercanías del punto de toma de muestra de agua. Además, se aprecia que el recorrido del agua por la base de las presas no incrementó los contenidos disueltos, sino que disminuyeron. De algún modo esto está de acuerdo con los bajos niveles de elementos lixiviados a los que se ha hecho referencia más arriba y es muy posible que los sedimentos de origen minero depositados en la rambla se comporten de modo semejante a los residuos mineros más abundantes en la cabecera, por lo que se espera que la solubilidad de los elementos sea muy baja.

2.4.6. Conclusiones: necesidad de actuaciones de remediación y rehabilitación

Por todo lo anterior, está plenamente justificada la aplicación de medidas de rehabilitación o restauración de las instalaciones mineras situadas en las cuencas vertientes al Mar Menor. No se han considerado en este capítulo las modificaciones topográficas que pueden ser necesarias en cada caso concreto, y las medidas de refuerzo de la estabilidad estructural. Sin embargo, de lo que se puede conocer a partir de la caracterización geoquímica si es posible extraer alguna recomendación sobre la realización de esas labores. Con toda seguridad, especialmente en las instalaciones con residuos más generadores de acidez, como las de Pocilgas o Descargador I y II, los movimientos de tierra en labores de remodelación pueden hacer aflorar capas menos oxidadas y con concentraciones mayores de elementos tóxicos, que pueden pasar a oxidarse rápidamente, liberando elementos solubles.

Por otro lado, para la mayoría de las instalaciones, parece evidente que, incluso si se pudieran introducir importantes mejoras edáficas y se consiguieran pendientes suaves, es poco probable que se pueda garantizar a corto plazo una minimización aceptable de los procesos erosivos sólo con una cobertura vegetal. Por ello, y con objeto de reducir la emisión de sedimentos cargados de elementos potencialmente tóxicos, es aconsejable cubrir con suelos, sustitutos de suelo o tecnosoles. Dada la climatología de la zona, podría ser aceptable considerar la aplicación de las llamadas coberturas de almacenamiento y liberación. Sin embargo, el diseño de este tipo de coberturas requiere una experimentación en parcelas sometidas a un monitoreo prolonga-

do, para la que probablemente no se disponga del tiempo que sería necesario. Es por esto que otra opción a contemplar es el diseño de tratamientos encaminados a la impermeabilización, que incluyan capas con capacidad para proporcionar una ruptura capilar, puesto que, incluso en aquellas instalaciones en las que se aportaron materiales de tipo suelo se ha comprobado que ha habido migración de contaminantes desde los residuos. Incluso en las instalaciones de residuos situadas en las proximidades del Cabezo Rajao, cuyos residuos no son excepcionalmente ácidos, parece evidente que es posible la puesta en solución de elementos tóxicos, que se verá normalmente potenciada tras las primeras lluvias a final del verano.

Una posible excepción a este planteamiento general es la cabecera del Barranco de Magreros (cuenca de la Rambla de la Carrasquilla), donde los datos permitirían admitir de modo preliminar que los materiales serían susceptibles de una fitoestabilización asistida, como se ha abogado en algunos trabajos publicados. Incluso, tal vez sería factible su empleo para el tapado de los residuos que pudieran presentar peores características a los dos lados de la divisoria de aguas con la Rambla de Mendoza, como primer paso para después planificar las operaciones de fitoestabilización. No obstante, sería interesante comprobar con más datos la posibilidad de lixiviación de elementos contaminantes de los materiales existentes en la cabecera de la Rambla de Mendoza. Hay que tener en cuenta que esta confirmación podría generalizar las recomendaciones a la zona situada al otro lado de la divisoria de aguas.

Bibliografía

- Acosta, J. A., Martínez-Pagán, P. Martínez-Martínez, S. Faz, A. Zornoza, R., & Carmona D. M. (2014). Assessment of environmental risk of reclaimed mining ponds using geophysics and geochemical techniques. *Journal of Geochemical Exploration*, 147, 80-90.
- Alcolea-Rubio, A. (2015). *Geoavailability of Ni, Cu, Zn, As, Cd, and Pb in the Sierra de Cartagena-La Unión (SE Spain)*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica. Cartagena, Murcia.
- Alcolea-Rubio, L. A., Caparrós-Ríos, A. V., Robles-Arenas, V., García-García, C. García, G., Millán, R., et al. (2023). Environmental Implications of Saline Efflorescence Associated with Metallic Mining Waste in a Mediterranean Region. *Land*, 12, 4.
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils. Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. Third Ed. Environmental pollution. Springer. London, UK.
- ANZECC/ARMCANZ. (2000). Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality. Australian and New Zealand Environment and Conservation Council/Agricultural and Resource Management Council of Australia and New Zealand.
- Arranz González, J. C., Rodríguez Gómez, V., Rodríguez Pacheco, R., Fernández Naranjo, F. J., Vadillo Fernández, L., & Albe-

- rruche del Campo, E. (2019). *Guía para la rehabilitación de instalaciones abandonadas de residuos mineros*. Ministerio para la Transición Ecológica. Madrid. https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/guia-rehabilitacion-instalaciones-residuos-mineros-abandonadas-2019_tcm30-496582.pdf
- Belmonte Serrato, F., Romero Díaz, A., & Moreno Brotóns, J. (2010). Contaminación ambiental por estériles mineros en un espacio turístico en desarrollo, la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (sureste de España). *Cuadernos de Turismo*, 25, 11-24.
- Belzile, N., & Chen, Y. (2017). Thallium in the environment: A critical review focused on natural waters, soils, sediments and airborne particles. *Applied geochemistry*, 84, 218-243.
- Bes, C. M., Pardo, T., Bernal, M. P., & Clemente, R. (2014). Assessment of the environmental risk associated with two mine tailing soils from the La Unión-Cartagena mining district. *Journal of Geochemical Exploration*, 147, 98-106.
- Conesa, H., Faz, Á., & Arnaldos, R. (2006). Heavy metal accumulation and tolerance in plants from mine tailings of the semiarid Cartagena-La Unión Mining District (SE Spain). *Science of the Total Environment*, 366, 1-11.
- Conesa, H.M., García, G., Faz, A., & Arnaldos, R. (2007). Dynamics of metal tolerant plant communities' development in mine tailings from the Cartagena-La Unión Mining District (SE Spain) and their interest for further revegetation purposes. *Chemosphere*, 68, 1180-1185.
- Conesa, H. M., Robinson, B. H., Schulin, R., & Nowack, B. (2008). Metal extractability in acidic and neutral mine tailings from the Cartagena-La Unión Mining District (SE Spain). *Applied Geochemistry*, 23(5), 1232-1240.
- DIN-NORMEN 1984. DIN 38414-S4. *German Standard Methods for the examination of water, waste water and sludge; group S (sludge and sediments); determination of leachability by water (S4)*. Deutsche Norm, Teil 4 Okt, 464-475.
- EPA-Victoria. (2021). *Waste disposal categories-characteristics and thresholds*. Publication 1828.2. Victoria State Government. Melbourne.
- European Committee for Standardization. (2002). *EN 12457-2 Standard: Characterización of waste-Leaching-Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges- Part 2: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10l/kg for materials with high solid content and with particle size below 4 mm (without or with size reduction)*.
- Fernández-Naranjo, F. J., Arranz-González, J. C., Rodríguez-Gómez, V., Rodríguez-Pacheco, R. L., & Vadillo, L. (2020). Geochemical anomalies for the determination of Surface stream sediments pollution: case of Sierra de Cartagena-La Unión mining district, Spain. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 247.
- García-García, C. (2004). *Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia-España)*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica. Cartagena, Murcia.
- García-García, C., Robles-Arenas, V. M., Castejón-Fernández, C., & Rodríguez-Pacheco, R. (2022). Revisión de la clasificación y cartografía de los depósitos de residuos mineros ubicados en la cuenca de la rambla del Beal en Cartagena. *Energía & Minas: Revista Profesional, Técnica y Cultural de los Ingenieros Técnicos de Minas*, 18, 24-39.
- García-García, G., & Muñoz-Vera, A. (2015). Characterization and evolution of the sediments of a Mediterranean coastal lagoon located next to a former mining area. *Marine Pollution Bulletin*, 100(1), 249-263.
- García-Lorenzo, M. L., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M. J., & Molina-Ruiz, J. (2012). Trace elements contamination in an abandoned mining site in a semiarid zone. *Journal of Geochemical Exploration*, 113, 23-35.
- Gómez-Ros, J. M., García, G., & Peñas, J. M. (2013). Assessment of restoration success of former metal mining areas after 30 years in a highly polluted Mediterranean mining area: Cartagena-La Unión. *Ecological Engineering*, 57, 393-402.
- González-Fernández, O., Jurado-Roldán, A. M., & Queralt, I. (2010). Geochemical and mineralogical features of overbank and stream sediments of the Beal wadi (Cartagena- La Unión mining district, SE Spain): Relation to former lead-zinc mining activities and its environmental risk. *Water, Air, and Soil Pollution*, 215 (1-4), 55-65.
- Howie, H. (1980). *Water quality and its control in mining areas*. In: Proceedings of the 4th Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium. The Technical and Research Committee on Reclamation. Vernon, BC.
- Lawrence, R.W., & Wang, Y. (1997). Determination of Neutralization Potential in the Prediction of Acid Rock Drainage, Proceedings of the 4th International Conference on Acid Rock Drainage, Vancouver, 31 May-6 June 1997, p. 449-464.
- Lottermoser, B.G. (2005). Evaporative mineral precipitates from a historical smelting slag dump, Rio Tinto, Spain. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen*, 181, 183-190.
- Manteca, J. I., & Ovejero, G. (1992). Los yacimientos Zn, Pb, Ag-Fe del distrito minero de La Unión-Cartagena, Bética Oriental. In: García-Guinea, J., Martínez-Frías, J. (coords). *Recursos Minerales de España*. CSIC, Madrid. pp. 1085-1102.
- Marguí, E., Salvadó, V., Queralt, I., & Hidalgo, M. (2004). Comparison of three-stage sequential extraction and toxicity characteristic leaching tests to evaluate metal mobility in mining wastes. *Analytica Chimica Acta*, 524, 151-159.

- Marín-Guirao, L., Cesar, A., Marín, A., & Vita, R. (2005). Assessment of sediment metal contamination in the Mar Menor coastal lagoon (SE Spain): Metal distribution, toxicity, bioaccumulation and benthic community structure. *Ciencias Marinas*, 31, 413–428.
- Marín-Guirao, L., Lloret, J., Marín, A., García, G., & García-Fernández, A.J. (2007). Pulse discharges of mining wastes into a coastal lagoon: water chemistry and toxicity. *Chemistry and Ecology*, 23(3), 217–231.
- Martín-Crespo, T., Gómez-Ortiz, D., Martín-Velázquez, S., Martínez-Pagán, P., de Ignacio-San José, C., Lillo, J., & Faz, A. (2018). Geoenvironmental characterization of unstable abandoned mine tailings combining geophysical and geochemical methods (Cartagena-La Union district, Spain). *Engineering Geology*, 232, 135–146.
- Martín-Crespo, T., Gómez-Ortiz, D., Martín-Velázquez, S., Martínez-Pagán, P., Ignacio-San José, C., Lillo, J., & Faz, A. (2020). Abandoned Mine Tailings Affecting Riverbed Sediments in the Cartagena–La Union District, Mediterranean Coastal Area (Spain). *Remote Sensing*, 12, 2042.
- Martínez-Pagán, P., Faz, A., Acosta, J. A., Carmona, D. M., & Martínez-Martínez, S. (2011). A multidisciplinary study for mining landscape reclamation: A study case on two tailing ponds in the Region of Murcia (SE Spain). *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 1331–1344.
- Martínez Sánchez, M. J., Pérez Sirvent, C., Tudela Serrano, M. L., Linares Moreno, P., García Lorenzo, M. L., Hernandez Cordoba, M., et al. (2007). *Niveles de fondo y niveles genéricos de referencia de metales pesados en suelos de la Región de Murcia*. Murcia.
- Muñoz-Vera, A., Peñas-Castejón, J. M., & García, G. (2016). Patterns of trace element bioaccumulation in jellyfish *Rhizostoma pulmo* (Cnidaria, Scyphozoa) in a Mediterranean coastal lagoon from SE Spain. *Mar Pollut. Bull.* 110(1):143–154.
- Navarro-Cano, J. A., Goberna-Estellés, M., González-Barberá, G., Castillo-Sánchez, V. M., & Verdú del Campo, M. (2017). Restauración ecológica en ambientes semiáridos. Recuperar las interacciones biológicas y las funciones ecosistémicas. CSIC. Madrid.
- Navarro-Hervás, M. C., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M. J., Vidal, J. Tovar, P. J., & Bech, J. (2008). Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: A case study in a semi-arid zone. *Journal of Geochemical Exploration*, 96, 183–193.
- Navarro-Hervás, C., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M.J., García-Lorenzo, M.L., & Molina, J. (2012). Weathering processes in waste materials from a mining area in a semiarid zone. *Applied Geochemistry* 27(10), 1991–2000.
- Nieto-Liñán, J. M. (2023). Análisis de test ABA de muestras de suelo en depósitos mineros, caracterización química y recomendaciones para el tratamiento de suelos mineros. Ref. 1784651-2023-03. Grupo de Mineralogía y Geoquímica Ambiental, Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Huelva. Informe inédito.
- Párraga-Aguado, I., Querejeta, J. J., González-Alcaraz, M. N., Jiménez-Cárceles, F. J., & Conesa, H. M. (2014). Usefulness of pioneer vegetation for the phytomanagement of metal(loid)s enriched tailings: grasses vs. shrubs vs. trees. *Journal of Environmental Management*, 133, 51–58.
- Piatak, N.M., Seal II, R.R., & Hammarstrom, J.M. (2004). Mineralogical and geochemical controls on the release of trace elements from slag produced by base- and precious-metal smelting at abandoned mine sites. *Applied Geochemistry*, 19, 1039–1064.
- Robles-Arenas, V.M., Rodríguez, R. García, C., Manteca, J.I., & Candela, L. (2006). Sulphide-mining impacts in the physical environment: Sierra de Cartagena-La Unión (SE Spain) case study. *Environmental Geology*, 51, 57–64.
- Sánchez-Bisquert, D., Peñas-Castejón, J.M., & García-Fernández, G. (2017). The impact of atmospheric dust and trace elements levels on the villages surrounding the former mining areas in a semiárid environment (SE Spain). *Atmospheric Environment*, 151, 256–269.
- Sánchez-Virosta, P., León-Ortega, M., Calvo, J. F., Camarero, P. R., Mateo, R., Zumbado, P. et al. (2020). Blood concentrations of 50 elements in Eagle owl (*Bubo bubo*) at different contamination scenarios and related effects on plasma vitamin levels. *Environmental Pollution*, 265 (Part A), 115012.
- USEPA. (1994). *Method 1311, Toxicity Characteristic Leaching Procedure*. Test Methods for Evaluating Solid Wastes Physical/Chemical Methods, United States Environmental Protection Agency.

2.5. Riesgo geotécnico-estructurales en presas de lodos mineros, balsas y escombreras

AUTORES: Roberto Rodríguez-Pacheco; Joanna Butlanska y Aldo Onel Oliva González.

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME). Cristóbal García-García. Profesor jubilado, Universidad Politécnica de Cartagena UPCT.

2.5.1. Introducción

El riesgo geotécnico-estructural de las instalaciones de residuos mineros (IRMAs) en la zona de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (SMCLU) se ha analizado principalmente considerando sus características geotécnico-estructurales, dividiéndolas en: 1) presas de lodos mineros (relaves), 2) balsas de lodos mineros (relaves) y 3) escombreras de estériles mineros. El principal riesgo geotécnico-estructural que caracteriza las presas de lodos mineros es la ocurrencia de fallas de flujo causadas por fenómenos asociados al comportamiento hidromecánico de los lodos (licuefacción estática y dinámica, filtración, tubificación, capilaridad, succión, etc.). En el caso de las balsas de lodos mineros el riesgo está asociado a la presencia de colapsos debido a subsidencia o asentamientos excesivos de la

cimentación. Las escombreras presentan riesgos de inestabilidad geotécnica por deslizamientos y desprendimientos. Se presentan resultados de estudios realizados e imágenes que permiten al lector, mediante el principio de la observación, identificar en el campo los diferentes riesgos geotécnico-estructurales presentes en las IRMAs.

En los trabajos realizados con anterioridad se analizaron principalmente las presas de lodos mineros (Faz et al., 2003; García-García 2004; Rodríguez et al., 2011; Rodríguez-Pacheco et al., 2024). El análisis del riesgo de las escombreras solo se ha realizado en el inventario de balsas y escombreras (ITGE, 1999). El riesgo ambiental de las IRMAs fue analizado por García-García 2004.

2.5.2. Definición de conceptos claves

1) Tipos de instalaciones de residuos mineros abandonados (IRMAs):

- **Presa:** es una estructura u obra de ingeniería civil construida sobre la superficie del terreno para el almacenamiento de los residuos de la industria extractiva en forma de lodos mineros, lodos espesados o pasta. La obra de ingeniería generalmente es un dique exterior de tierra u otro material que delimita una superficie determinada. El área delimitada por el dique se denomina vaso de la presa. En el interior del vaso están almacenados los residuos minero-metalúrgicos. En ella se pueden distinguir los siguientes tipos: aguas arriba, aguas abajo, línea central y línea central desplazada (Rodríguez et al., 2011). En la SMCLU todas son del primer tipo.

- **Balsa:** es un hueco en el terreno de origen natural o artificial en el cual se depositan los residuos de la industria extractiva en forma de lodos. Normalmente se emplean antiguas explotaciones mineras a cielo abierto (cortas) y, en ocasiones, lagos o depresiones naturales del terreno.
- **Escombrera:** una instalación de residuos mineros construida para el depósito de residuos sólidos de la industria extractiva en la superficie del terreno.

2) Tipos de riesgos geotécnico-estructurales:

- **Deslizamientos:** son los desplazamientos, pendiente abajo, de una masa del terreno (suelo, roca, lodos u otros residuos mineros sólidos) sobre una o más superficies de rotura o zonas relativamente delgadas con

intensa deformación de cizalla. Este tipo de movimiento se caracteriza por la presencia de superficies de rotura definidas y la preservación, a grandes rasgos, de la forma de la masa desplazada. Se clasifican en rotacionales o traslacionales, siendo importante la distinción entre ellos para el análisis de la estabilidad geotécnica y el diseño de las medidas de control y corrección (Oliva, 1999).

- **Tubificación (*piping*):** Es un fenómeno asociado a la erosión interna producida por las fuerzas de filtración en los materiales, y consiste en la formación de conductos continuos a lo largo de líneas de corriente del flujo de agua debido al arrastre de partículas. En el caso particular de las presas y balsas de lodos mineros, también se pueden formar por disolución de la masa de sólidos.
- **Licuefacción:** consiste en la pérdida brusca de resistencia y rigidez de los materiales predominantemente granulares y en presencia de agua. Básicamente, este fenómeno se produce debido a un incremento de la presión de poros que genera la disminución de la tensión efectiva entre partículas, provocando que los materiales se comporten como un fluido. La licuefacción puede estar asociada a cargas dinámicas que generan movilidad cíclica de las partículas (licuefacción dinámica) o a cargas estáticas importantes en materiales sueltos contractivos (licuefacción estática o por flujo).
- **Subsidencia:** en términos geológico-geotécnicos, se refiere al hundimiento progresivo de la superficie del terreno como consecuencia

de una serie de mecanismos subsuperficiales de deformación. Algunas de las causas de este fenómeno son las actividades mineras subterráneas, la extracción de fluidos (agua, petróleo o gas), el descenso del nivel freático, la disolución química o biológica de materiales, la erosión hídrica interna (*piping*), los procesos morfotectónicos y de sedimentación, o los procesos de consolidación de suelos.

- **Grietas de tracción:** son fisuras que se producen debido a la pérdida de cohesión o por rotura de la estructura del terreno (suelo, roca o materiales similares). Se originan por fuerzas de tensión, generalmente asociadas a movimientos en la masa de terreno como deslizamientos o asentamientos.
- **Grietas de retracción:** son las fisuras que se generan en el terreno cuando la humedad del mismo disminuye debido a la evaporación, produciendo un reajuste en la disposición de los granos que conforman la estructura de los materiales. Este fenómeno trae consigo una disminución en el volumen, y al no existir agua que rellene el espacio entre los poros, se forman fisuras en la superficie que pueden variar en profundidad y espaciamiento.
- **Erosión en cárcavas:** es un proceso de degradación del terreno debido a un flujo de agua concentrado, a través del cual fluye la escorrentía durante o inmediatamente después de un evento intenso de lluvia, formando incisiones más grandes y profundas que un reguero.

2.5.3. Materiales

Para la realización del trabajo se ha utilizado la cartografía geológica, cartografía de balsas y escombros; topografía del vuelo Lidar (2011, 2019) realizado

en la zona y la cartografía realizada por el CN IGME CSIC, así como la información de diferentes artículos, informes, tesis y tesinas.

2.5.4 Métodos

Se ha realizado la cartografía *in situ*, la caracterización geotécnica de los materiales, y el análisis de la estabilidad geotécnico-estructural de diferentes IRMAs existentes en la zona de estudio. El análisis de la estabilidad geotécnico-estructural se ha realizado utilizando simulaciones numéricas mediante códigos de las compañías Rocscience y Geoslope,

que permitieron evaluar los niveles de seguridad y determinar factores desencadenantes de inestabilidad geotécnica, bajo diferentes escenarios y tipos de solicitaciones a las que están expuestas (condiciones normales, accidentales y extremas). Sin embargo, el análisis numérico detallado no se incluye en este documento.

2.5.5. Resultados

Riesgos geotécnico-estructural en presas de lodos mineros (relaves)

Deslizamientos. Estos son mayoritariamente de tipo gravitacional y se presentan en un gran número de

presas de lodos mineros. Están favorecidos por las pendientes de los taludes, la baja cohesión de los materiales y el desarrollo de procesos diferenciales de erosión eólica e hídrica, como lo demuestra el saliente de las capas en la superficie del talud (**Figura 1**).

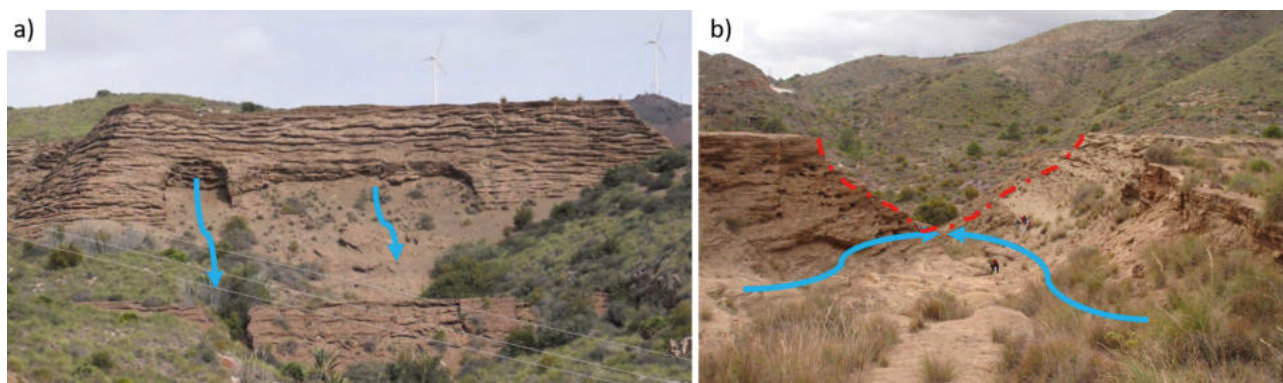


Figura 1. Riesgos geotécnico-estructurales en las presas de lodos mineros (relaves) a) deslizamiento del talud, b) falla de flujo tras el deslizamiento del talud. Las presas están localizadas en la rambla de Portman. Las flechas indican la dirección del movimiento de la masa de lodos mineros. Obsérvese la magnitud y escala del deslizamiento de la derecha con las personas que aparecen en la imagen.

Tubificación (Piping). Este proceso está registrado en un gran número de presas de lodos mineros de la SMCLU (**Figura 2**). Es común para los materiales

finos (arena-limosa), que se almacenan en las presas y balsas de lodos mineros. Su desarrollo ocurre en presas restauradas y sin restaurar.

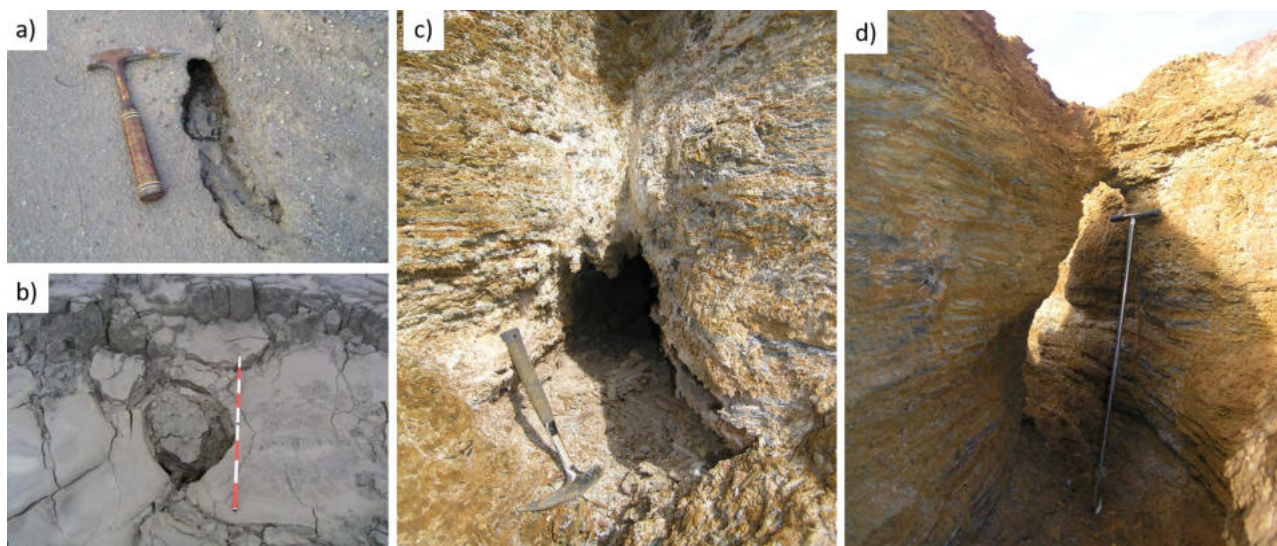


Figura 2. Riesgos geotécnico-estructurales en las presas de lodos mineros (relaves) con diferentes formas de piping, a) incipiente, b) en desarrollo, c) horizontal en profundidad del talud de la presa, d) horizontal cercano a la superficie. Las imágenes a) y b) corresponden a la balsa de lodos mineros Tomasa. Las imágenes c) y d) corresponden a la presa de lodos mineros Brunita antes de que fuera remodelada. Los colores blancos se deben a la precipitación de sales de sulfatos. Las capas de color gris corresponden a los lodos sin oxidar. Las capas de color ocre son las capas arenosas de los lodos mineros oxidados.

Licuefacción y fallas de flujo en presas de lodos mineros. De acuerdo con la cartografía de las IRMAS y la información disponible en la SMCLU se han producido

tres fallas de flujo de cierta importancia en las presas de lodos mineros: Brunita, El Descargador I y Peña del Águila. De todas ellas la más importante es la de la presa

Brunita (**Figura 3**). En todos los casos se ha identificado la presencia de diques de arena que indican el desarrollo de la licuefacción (**Figura 4**). Además, la zona afectada por las fallas de flujo ha sido documentada mediante fotos y planos (**Figura 1b**, **Figura 3a-d**). En las imágenes se puede apreciar como los diques de arena surgen de

las profundidades cortando verticalmente los estratos horizontales (**Figura 4b y e**). La presencia de los diques de arena ha sido documentada en todas las presas de lodos mineros existentes en la SMCLU, independientemente de su altura, largo o superficie. Esto confirma que todos los lodos mineros de la SMCLU son licuefactables.

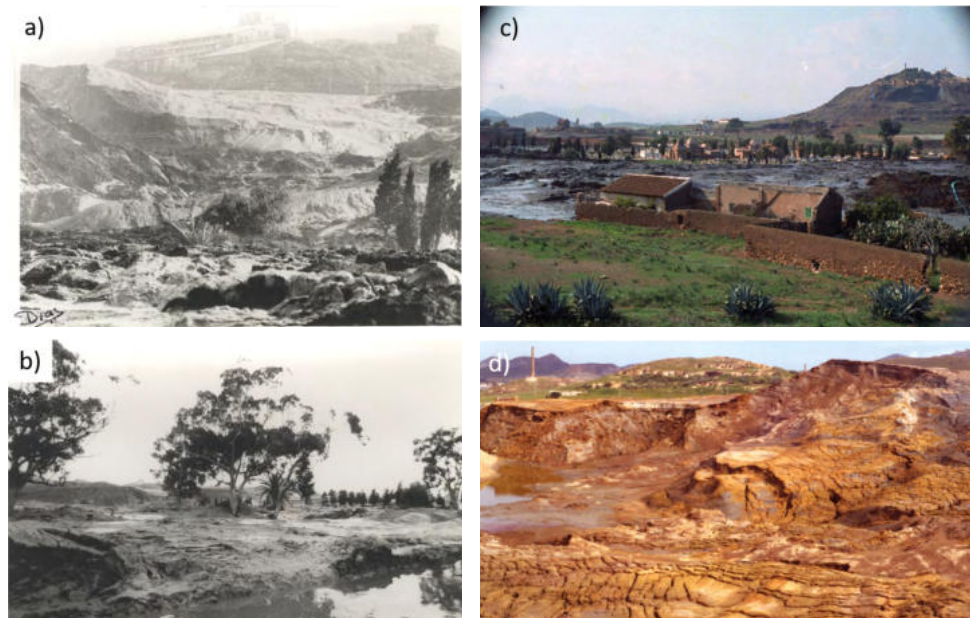


Figura 3. Falla de flujo en la presa Brunita (1972) debido a tubificación y disminución de la succión por saturación, a) frente del deslizamiento en 1972, b) zona de inundación en las proximidades de la carretera nacional y el poblado de Corea, c) área de inundación entre la presa y el cementerio de la Unión y d) foto del área deslizada una semana después. Las fotos a), b) y c) son cortesía del hijo del fotógrafo Alfonso Díaz.

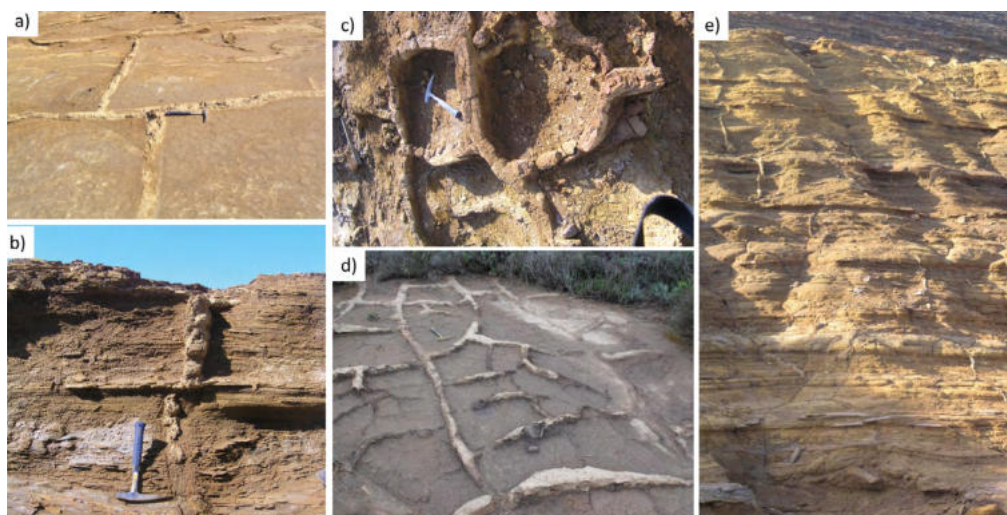


Figura 4. Riesgos geotécnico-estructurales en las presas de lodos mineros (relaves) con diferentes formas geométricas de diques de arenas, resultado de la licuefacción del material, a) diques en superficie, presa de lodos mineros Brunita, b) en el perfil vertical, c) en superficie horizontal, en la presa de lodos El Descargador I, d) presa de lodos El Gorguel y e) diques en la superficie del deslizamiento Norte de la presa El Descargador II.

Subsidencia de la superficie del terreno. Se aprecia en las presas de lodos mineros debido a la erosión interna de los lodos del proceso de flotación sedimen-

tados en ellas. El proceso tiene dos orígenes: 1) por arrastres de las partículas finas y 2) por disolución debido a la agresividad de las aguas que, en la mayo-

ría de los casos, presentan pH ácido ($\text{pH} < 6$). Cuando se manifiestan en superficie, la principal causa es el hundimiento del techo de cavidades, galerías o po-

zos subterráneos existentes debajo de la presa, debido a la sobrecarga producida por el peso propio de la masa de lodos mineros (Figura 5).

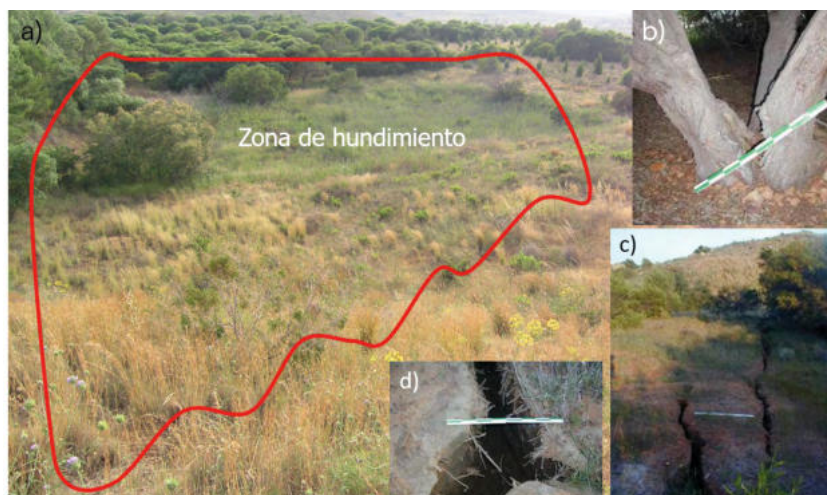


Figura 5. Riesgos geotécnico-estructurales en las presas de lodos mineros (presa de relaves) Marqués de Pejar, a) colapso, b) agrietamiento del tronco de los árboles indicativo de colapso o subsidencia, c) grietas de tracción de decenas de metros, d) detalle de las grietas de tracción donde se aprecia el ancho.

Grietas de tracción. Aparecen en aquellas presas y balsas de lodos mineros que han sufrido deslizamientos y desprendimientos de su talud original y hundimientos por causas naturales o antropogénicas (Figura 5c y d). Un caso particular es aquel donde la vegetación colonizadora, tras la reforestación, provoca una consolidación de los lodos producto al consumo del agua, por el proceso de evapotranspiración de las plantas, almacenado en los poros de los residuos (Figura 5c y d). Como se puede observar, el efecto de la vegetación también provoca el agrietamiento de los lodos consolidados, el suelo, además el proceso de consolidación de los lodos provoca el agrietamiento de los árboles (Figura 5b).

Desprendimientos. Son caídas de bloques de lodos mineros cementados que tienen la consistencia de una roca. Las presas de lodos mineros desprovistas de vegetación están particularmente expuestas al riesgo de deslizamientos debido a que una gran parte de la superficie de los taludes presenta pendientes muy elevadas (Figura 6). Estos están favorecidos por la fragilidad de las capas de lodos cementadas, la erosión diferencial de sus materiales y las lluvias intensas típicas del mediterráneo.

Grietas de retracción. Se desarrollan en las presas de lodos mineros debido a los procesos de secado y mojado que tienen lugar tanto durante el funcionamiento, como después del cierre y abandono (Rodríguez-Pacheco et al., 2024). Durante el funcionamiento de la presa los procesos de secado y mojado se producen debido a las lluvias y al cambio del punto

de vertido de lodos; mientras que después del cierre y durante el abandono, estos procesos ocurren en la laguna de decantación, donde además se acumulan los productos de la erosión hídrica (Figura 7).



Figura 6. a) Riesgos geotécnico-estructurales en las presas de lodos mineros (relaves) con diferentes formas geométricas de desprendimiento en bloques y deslizamiento. a) presa El Descargador II y b) presa El Descargador I.

Erosión en cárcavas. Este fenómeno se aprecia tanto en el talud como en el vaso de las presas de lodos mineros (Figura 8). Es el resultado del arrastre y vaciado de las partículas de lodos por un flujo concentrado que da lugar a estrechas incisiones, de mayor tamaño y profundidad que un reguero, lo cual tiene lugar sólo durante e inmediatamente después de fuertes precipitaciones típicas de la zona semiárida del mediterráneo donde se producen DANAs con frecuencia (Figura 8).

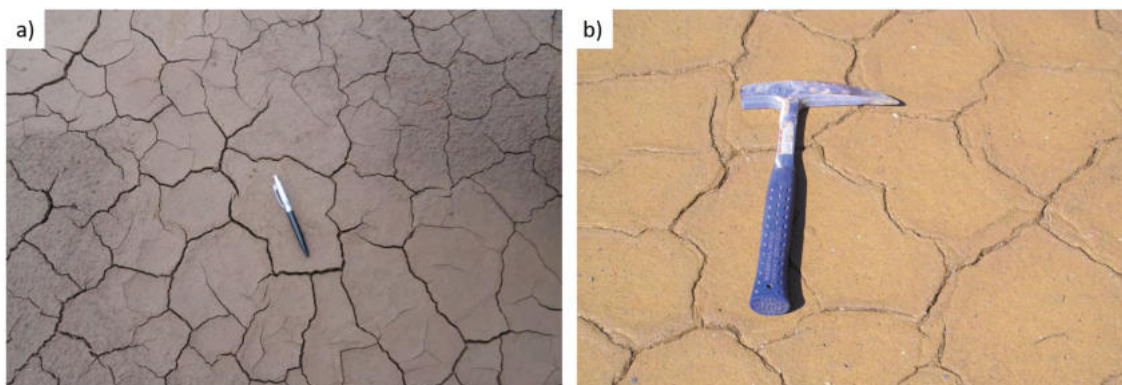


Figura 7. Riesgos geotécnico-estructurales en las presas de lodos mineros (relaves) con diferentes formas geométricas de grietas de retracción o desecación, a) laguna presa de lodos El Gorguel, b) laguna presa de lodos El Descargador I.

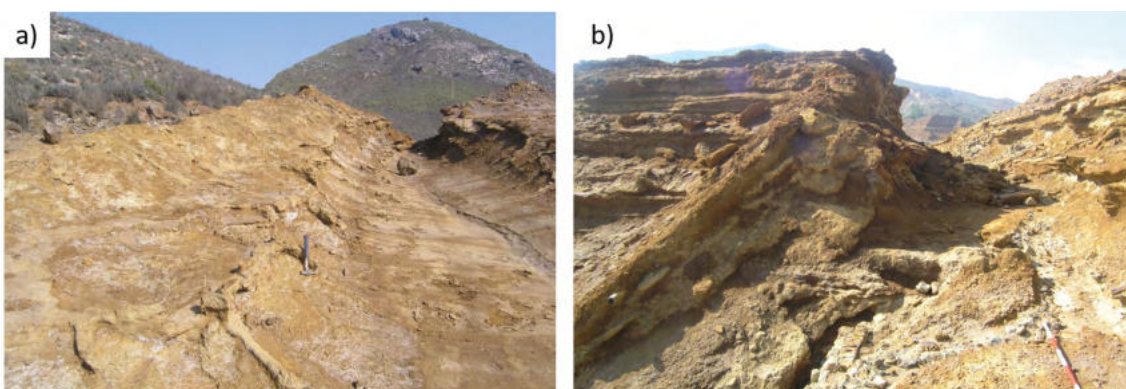


Figura 8. Riesgos geotécnico-estructurales en las presas de lodos mineros (relaves) con diferentes formas geométricas de erosión en cárcavas, a) erosión en cárcavas dentro de la presa de lodos mineros El Descargador II tras la construcción de una zanja de drenaje para evacuar el agua que se acumulaba en la laguna de decantación y b) salida de la cárcava o zanja por el talud de la presa de lodos mineros, obsérvese la estratificación de capas de diferente espesor en el talud.

Riesgos geotécnico-estructural en balsas de lodos mineros

Subsidencia o colapso. Este proceso ocurrió en el año 1991, en la balsa de lodos Tomasa (**Figura 9**) (CHS, 1991).

Grietas de tracción. Están presentes en las balsas de lodos debido, principalmente, a la ocurrencia de un colapso interno. Normalmente, el colapso puede producirse por fallos de la fundación. En nuestra área de estudio solo tenemos el caso de la balsa Tomasa (**Figura 9c-e**), la cual experimentó un colapso en el año 1991.

Erosión en cárcavas. La erosión en cárcava en las balsas de lodos mineros se desarrolla durante los cambios de los puntos de vertido y tras el proceso de abandono. Su desarrollo está favorecido porque la balsa ha experimentado un colapso (**Figura 9a**). El

área afectada por el colapso facilita la acumulación del agua durante las épocas de lluvia (**Figura 9b**) e incrementa el tiempo de residencia del agua en la superficie de la balsa y en el interior de los poros de los lodos mineros consolidados en su vaso. Estos factores facilitan la disolución de los materiales. La magnitud y forma del colapso se identifican en la **Figura 9c-e**.

Tubificación (Piping). El proceso se ha identificado en la balsa y presas de lodos en diferentes zonas de la SMCLU. En este caso, consideramos que el colapso de la estructura ha favorecido el desarrollo de la tubificación. Además, el funcionamiento hidrológico de la balsa que actúa como una cuenca endorreica donde se almacena agua de escorrentía, una gran parte del año (**Figuras 9c-d**). Esto facilita el proceso de reacción y disolución del material que se infiltra a las aguas subterráneas.

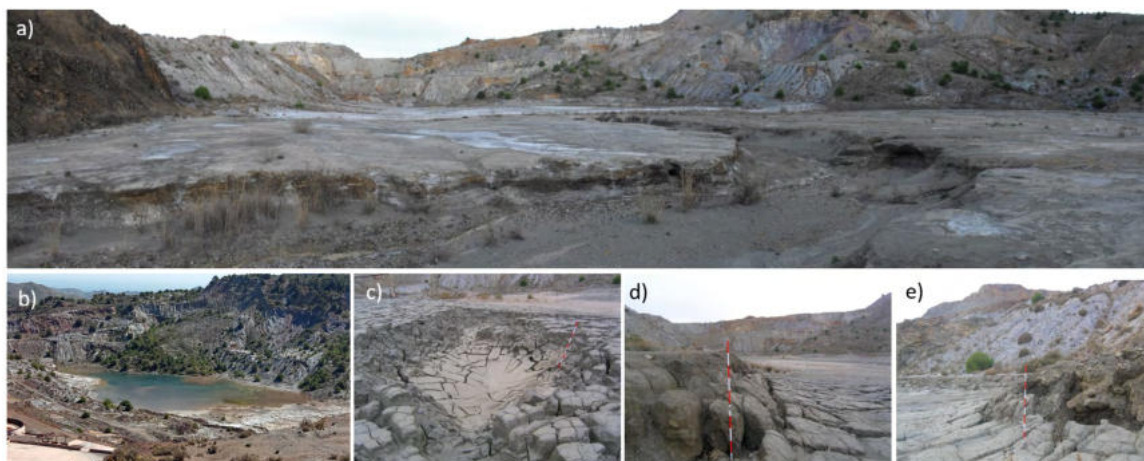


Figura 9. Riesgos geotécnico-estructurales en la balsa de lodos mineros (relaves) Tomasa, a) panorámica de la balsa donde se ve la cárcava interna resultado de la erosión hídrica, b) inundación de la balsa tras las lluvias y deslizamiento de las escombreras de filitas en el fondo, c) colapso central y grietas de tracción debido al cambio del estado tensional año 2005, d) se aprecia el escarpe producido por el colapso, con altura superior a un metro, e) colapso y piping en el lateral derecho de la balsa.

Grietas de retracción. Estas son el resultado del proceso de secado y mojado que experimentan los lodos mineros durante el llenado. Tienen un proceso de formación y características similares a las presas de lodos mineros (Figura 7). Con posterioridad al abandono las grietas aparecen en las zonas de materiales limo-arcillosos donde se desarrolla el proceso de secado y mojado, generalmente, asociado a la laguna de decantación.

Riesgos geotécnico-estructural en escombreras

Deslizamientos. Las escombreras de la zona de estudio presentan deslizamientos locales (Figura 10). Estos movimientos han sido estudiados por varios investigadores (García 2004; López-Vinielles et al., 2021).

Grietas de tracción. Las grietas de tracción son visibles en varias escombreras. Están favorecidas por las

enormes pendientes, longitud de los taludes y la carga desigual de la estructura (Figura 10b). Probablemente están favorecidas por la carga que provoca el aerogenerador construido sobre estos materiales.

Desprendimientos. Este proceso de inestabilidad está favorecido por los enormes tamaños que presentan los bloques que conforman las escombreras de estériles mineros generadas por el proceso de extracción del mineral por el método de minería a cielo abierto (Figura 10).

Erosión en cárcavas. Se manifiesta de diferentes formas e intensidad en las escombreras (Figura 10a, Figura 11a-d). Está controlada por la granulometría de los materiales y la pendiente de las laderas (Figura 10a y Figura 11a-d). En el caso de la SMCLU el ángulo de inclinación obedece generalmente al ángulo de reposo del material que se configura tras el vertido pendiente abajo. La mayoría de las escombreras presentan un factor de seguridad (F_s) en equilibrio límite ($F_s=1$).



Figura 10. Riesgos geotécnico-estructurales en las escombreras de estériles mineros, a) deslizamiento y erosión en cárcavas en las escombreras Los Blancos, b) grietas de tracción en la cabecera del talud de la escombrera bajo los aerogeneradores SMCLU, parte alta de la cuenca que limita con la presa el Descargador I.

Riesgos geotécnico-estructural en terreras de gravimetría

Erosión en cárcavas. La erosión hídrica que ha dado lugar a las cárcavas esta favorecida por la pen-

diente, la falta de compactación y la deforestación (**Figura 11**). En el caso de la SMCLU las terreras de gravimetría también se han depositado pendiente abajo y todas ellas se encuentran en equilibrio límite al igual que las escombreras.

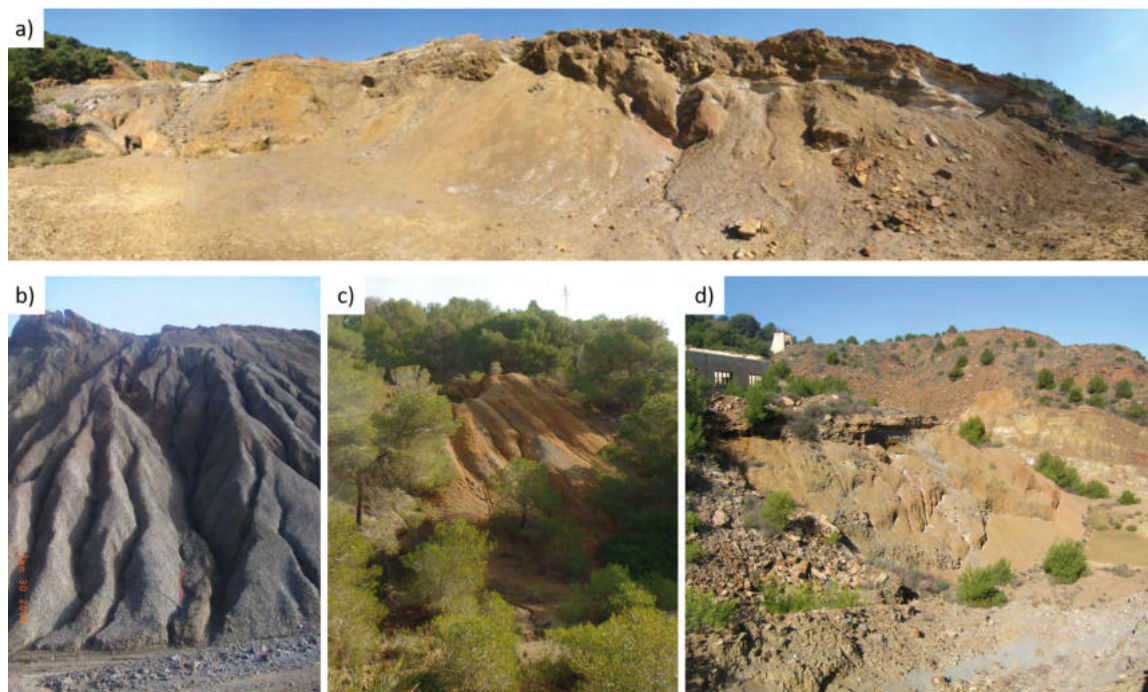


Figura 11. Riesgos geotécnico-estructurales en las terreras de gravimetría, a) panorámica de una terrera de gravimetría cuenca del Beal: se ven las cárcavas resultado de la erosión hídrica y erosión diferencial producto de la lluvia y el viento en la parte superior izquierda, b) cárcavas en escombrera de gravimetría en el nacimiento de la rambla Carrasquilla, c) erosión en cárcavas en una terrera de gravimetría rodeada de pinos cerca de la balsa Rosa, d) erosión diferencial en una terrera de gravimetría al lado de la presa de lodos El Lirio. Las tonalidades en blanco responden a la presencia de sulfatos y los cambios de coloración dependen del tipo de material.

2.5.6. Discusión. Análisis de la estabilidad geotécnico-estructural de la presa de lodos mineros Brunita que fallo el 20 de octubre 1972

A continuación, se presenta un resumen del trabajo realizado en la presa de lodos mineros Brunita (construida en 1956 y cerrada en 1981), ubicada en el término municipal de La Unión, Murcia (**Figura 12**). Esta presa fallo el 20 de octubre de 1972 a las 18:15 de la tarde (**Figura 3**). A continuación, se describen brevemente los acontecimientos basados en el informe del Ministerio de Industria con fecha 25 de octubre de 1972 (MI, 1972).

El temporal de los días 17, 18 y 19 de octubre de 1972 provocó una lluvia acumulada de 217 l/m², según registro de la estación climatológica de Cabo de Palos y de 119 l/m² en la estación climatológica del Algar (García, 2004). La inundación de la presa y la incapacidad del sistema de

drenaje para evacuar el agua de proceso unida a la de la lluvia provocaron el socavamiento del talud. La erosión interna ocurrió por el lado oeste (poniente) del dique. La brecha inicial del día 19 de octubre de 1972 fue de 18 metros de longitud. Las aguas de recuperación del proceso no cabían por el sistema de drenaje existente y al salirse por el exterior provocaron la erosión interna y por la brecha abierta salieron lodos mineros que se encontraban en ese sector de la presa. Este proceso estuvo relacionado con la erosión interna (tubificación) de los materiales en el entorno de una de las tuberías de salida de las aguas de recuperación.

Después del accidente del 19 de octubre, el día 20 se llevó a cabo una inspección de la presa en la que se de-

teció resumen de agua en diferentes partes del dique. Esto permitió alertar a las autoridades para evacuar a la población que vivía en una zona de viviendas cercana a la instalación (llamada Corea). Horas después, el 20 de octubre de 1972 a las 18:15, ocurrió una falla progresiva en el lado noroeste de la presa (**Figura 3** y **Figura 12c**).

La falla del día 20 comenzó con un deslizamiento en el Dique 1 (**Figura 12**), que, de manera súbita, desencadenó otro (deslizamiento 2) de grandes dimensiones que arrastró aguas abajo 70000 m³ de material en forma de flujo. Este incidente resultó en la completa destrucción de la presa, dañando también la pared exterior del cementerio. Los lodos se infiltraron en el área, causando la trágica muerte de una persona. Como resultado de esta invasión de lodos, se interrumpió el tráfico en la carretera Cartagena-Alicante.

Además, las tuberías que suministraban agua potable a La Unión y áreas cercanas quedaron inutilizadas, al igual que las líneas telefónicas. También se cortó el tráfico ferroviario de vía estrecha (FEVE) que conecta Cartagena con La Unión y Los Blancos.

La interpretación de datos y documentos históricos, así como de la información aportada por diversos estudios (Martínez-Pagán et al., 2011; Rodríguez et al., 2011; Moreno-Perales, 2016; Martín-Crespo et al., 2018; HORYSU, 2023; GEOZONE, 2023), permitieron definir las propiedades físico-mecánicas de los materiales, geometría y condiciones de contorno de la presa antes de la rotura; y elaborar modelos para simular numéricamente su comportamiento hidromecánico y geotécnico, en condiciones similares a las que existían en el momento de la falla (**Figura 12**).

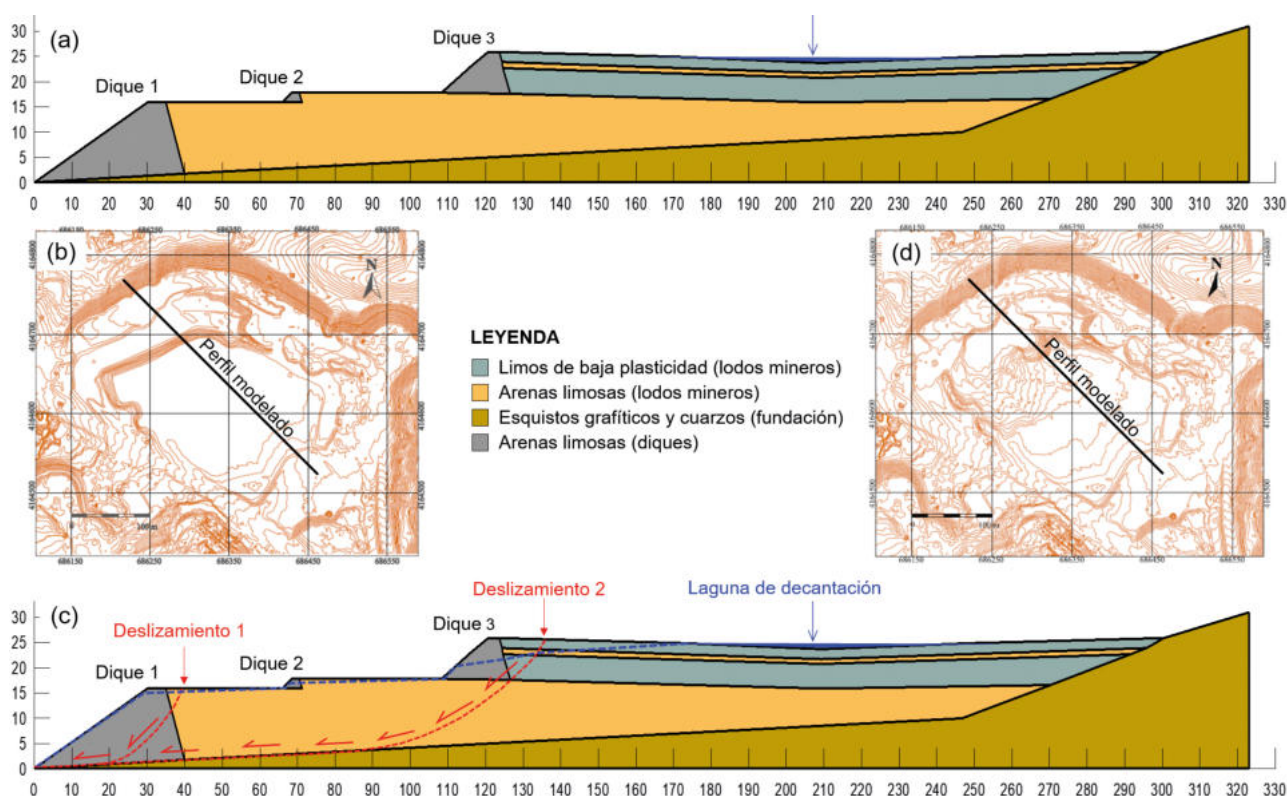


Figura 12. Simulación del comportamiento hidromecánico y geotécnico del perfil donde ocurrió la rotura principal de la presa de lodos mineros Brunita, (a) modelo utilizado, (b) ubicación del perfil modelado en la planta topográfica de la presa antes de la rotura, (c) mecanismo de rotura de la falla progresiva ocurrida por el lado noroeste de la presa, (d) ubicación del perfil modelado en la planta topográfica de la presa después de la rotura.

Para el análisis se consideraron las propiedades geotécnicas e hidráulicas presentadas en la **Tabla 1**, así como las funciones de contenido volumétrico de agua y conductividad hidráulica de los lodos mineros obtenidas para las trayectorias de humectación.

A partir de la interpretación de los documentos históricos y de los resultados de la simulación nu-

mérica, se determinaron las causas y el mecanismo de rotura más probable que desencadenó la falla progresiva (dos deslizamientos) ocurrida el 20 de octubre de 1972.

Los resultados muestran que el agua aportada a la presa (237 l/m²) por las intensas lluvias ocurridas durante 17, 18 y 19 de octubre de 1972, fue la principal cau-

sa de la rotura. El agua que ingresó en la presa superó la capacidad de evacuación del sistema de drenaje y produjo erosión interna (tubificación) y la saturación total de los diques en un corto período de tiempo. El

proceso de tubificación en la presa Brunita se puede ver en las Figuras 2c y d. En relación al mecanismo de rotura, se pudo comprobar que se produjeron dos eventos de falla uno el día 19 y otro el 20 de octubre.

MATERIAL	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{sec} (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ c (°)	E (KPA)	v	k_h^{sat} (m/s)	k_v^{sat} (m/s)
Limos de baja plasticidad (lodos mineros)	18.50	16.84	15.14	28.25	1000	0.31	1.06E-08	1.06E-09
Arena limosa (lodos mineros)	19.60	17.84	38.00	30.00	3750	0.31	5.99E-09	5.99E-10
Arena limosa (diques)	21.00	19.11	49.00	31.00	4000	0.31	8.31E-09	8.31E-10
Esquistos gráficos y cuarzos (fundación)	22.00	20.02	150.00	40.00	100000	0.28	1.15E-12	1.15E-12

Tabla 1. Parámetros geotécnicos e hidráulicos de la presa de lodos mineros Brunita, γ_{sat} : densidad saturada, γ_{sec} : densidad seca, c: cohesión, E: modulo Young, permeabilidad satura horizontal, permeabilidad satura vertical y v: módulo de Poisson.

La simulación numérica del comportamiento hidromecánico y geotécnico de la presa Brunita y las condiciones que pudieron causar su rotura, así como los resultados obtenidos, permiten ver que el comportamiento hidromecánico y geotécnico de las presas de lodos mineros está condicionado por un conjunto de acciones y fenómenos relacionados con la interacción con la atmósfera (fundamentalmente agua-medio poroso). El conocimiento del balance de agua (entrada = salidas $\pm$ coeficiente de almacenamiento) es fundamental para garantizar su estabilidad. Se ha comprobado que si las presas de lodos mineros se encuentran

en condiciones no saturadas inferiores al 80 por ciento su estabilidad geotécnico-estructural está garantizada. Acciones que aportan o extraen agua de las presas como el vertido de lodos, lluvias, deshielos, flujos subterráneos y drenajes, así como fenómenos asociados a la granulometría y propiedades índices de los materiales como la permeabilidad, consolidación, infiltración, escurrimiento superficial, ascenso capilar o la succión, influyen de manera importante en la estabilidad geotécnico-estructural, tanto durante la etapa de construcción y operación de llenado como después del cierre y abandono de las mismas.

2.5.7. Conclusiones y recomendaciones

El trabajo de investigación revela que los factores condicionantes y desencadenantes de los riesgos geotécnicos-estructurales presentes en las IRMAS de la SMCLU, por su magnitud e importancia, se pueden establecer en el siguiente orden: 1) la erosión hídrica facilitada por la falta de cobertura, las elevadas pendientes y la nula cohesión de los materiales, 2) el proceso de tubificación o piping, 3) el deslizamiento de laderas, 4) el colapso de la cimentación debido al número desconocido de galerías existentes en la SMCLU y bajo las IRMAS y 5) los desprendimientos.

Las propiedades geotécnicas muestran que todos los lodos almacenados en las diferentes presas y

balsas de la SMCLU son contractivos y licuefactibles como lo confirma la presencia de diques de arenas en todas las presas y balsas.

Para abordar los riesgos geotécnico-estructurales, es crucial identificar y caracterizar adecuadamente las IRMAS (Instalaciones de Residuos Mineros Abandonadas). En la SMCLU, ninguna de estas IRMAS ha seguido una metodología específica de construcción y vertido.

Para lograr el cierre definitivo de las IRMAS, es necesario llevar a cabo una serie de acciones que garanticen la estabilidad geotécnico-estructural. Se recomienda un sistema de drenaje flexible utilizando

gaviones, ya que la experiencia ha demostrado que los sistemas rígidos contruados con estructuras (con o sin refuerzo de acero) suelen fallar (ver Figura 13a). Además, el sistema de cierre debe reducir la entrada

de agua en las estructuras porosas. Si los residuos mineros metalúrgicos se encuentran en condiciones no saturadas, se reduce el riesgo geotécnico de fallo y no hay flujo ni transporte de contaminantes.



Figura 13. a) Ejemplo de un sistema de drenaje rígido con tubos de hormigón y canal de cemento en la presa de lodos Marqués de Pejar restaurada, es sistema está roto y desconectado más de dos metros, b) un sistema de drenaje flexible con gaviones en la rambla de Portman y c) sistema de drenaje flexible con gaviones en la rambla del Beal.

Agradecimientos

Se agradece la financiación del MITER y en especial a la Dirección General de Biodiversidad por la financiación del contrato de la Dra. Joanna Butlanska y a

la Dirección General de Minas por la Financiación del Contrato del Dr. Aldo Onel Oliva González.

Bibliografía

- C.H.S. (Confederación Hidrográfica del Segura) (1991). Estudio hidrogeoquímico sobre la influencia del vertido a la corta Tomasa en la zona Llano del Beal-Portman. 30 pp.
- Faz, A., Aracil, E., Acosta, JA., Alcaráz, M., Conesa, H., García, G., García, C., Manteca, JI., Martínez, I., Martínez, P., Martínez, MA., Peñas, JM., Rodríguez, T., Rodríguez, R. y Trigueros (2003). Evaluación de riesgo y definición de medidas correctoras en depósitos de lodos abandonados procedentes de procesos de actividad extractiva en la Región de Murcia. Aplicación al depósito "Brunita". Consejería de Economía, Industria e Innovación, de la Comunidad Autónoma de Murcia. Dirección General de Industria, Energía y Minas (contrato No 0978-1-0026). 250 pp.
- García-García, C. (2004). Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia-España). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica. Cartagena, Murcia.
- García-García, C., Robles-Arenas, V. M., Castejón-Fernández, C., Rodríguez-Pacheco, R. (2022). Revisión de la clasificación y cartografía de los depósitos de residuos mineros ubicados en la cuenca de la rambla del Beal en Cartagena. Energía & Minas: Revista Profesional, Técnica y Cultural de los Ingenieros Técnicos de Minas, 18, 24-39.
- GEOZONE, 2023. Estudio geofísico mediante tomografía eléctrica, polarización inducida y MASW para proyecto de remediación ambiental de residuos mineros y emplazamientos afectados por la minería en los TT. MM. de Cartagena - La Unión. Informe Técnico, GEOZONE ASESORES S.L. 2023, 115p.
- HORYSU, 2023 Sondeos exploratorios con pruebas de penetración estándar y ensayos de laboratorio para estudio geológico y geotécnico en la cuenca del Mar Menor, La Unión, Murcia. LABORATORIOS HORYSU Inversiones de Murcia, S.L.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1999). Inventario Nacional de Balsas. Región de Murcia. 270 pp.
- López-Vinielles, J. et al. 2021. Combining Satellite InSAR, Slope Units and Finite Element Modeling for Stability Analysis in Mining Waste Disposal Areas. Remote Sens. 13. <https://doi.org/10.3390/rs13102008>
- Martín-Crespo, T., Gómez-Ortiz, D., Martín-Velázquez, S., Martínez-Pagán, P., De Ignacio, C., Lillo, J., Faz, A. Geoen-

vironmental characterization of unstable abandoned mine tailings combining geophysical and geochemical methods (Cartagena-La Union district, Spain), *Engineering Geology*, Volume 232, 2018, Pages 135-146, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.11.018>

Martínez-Pagán, P., Faz, A., Acosta, J.A., Carmona, D.M., Martínez-Martínez, S. A multidisciplinary study for mining landscape reclamation: A study case on two tailing ponds in the Region of Murcia (SE Spain), *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Volume 36, Issue 16, 2011, Pages 1331-1344, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.02.007>

MI (Ministerio de Industria). Informe sobre accidente ocurrido en el dique de estériles del lavadero Brunita, propiedad de la Empresa Eloy Celadrán Conesa, en término municipal de La Unión (Murcia). 25 de octubre 1972. Informe técnico. 1972.

Moreno-Perales, A. Stability calculation of the "Brunita" tailings dam, La Unión, Murcia, Spain. Master's Thesis 2016. Polytechnic University of Cartagena, 44 pages.

Oliva, A.O. Análisis de la estabilidad y seguridad de taludes. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo, 1999. Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo. <http://hdl.handle.net/10651/15589>

Rodríguez, R., García-García, C., Zarroca, M., Roqué, C., Linares, R. y Oldecop, L. Características geológicas y geotécnicas de los lodos de flotación de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (SE España). *Boletín Geológico y Minero. España*, 122 (2), 2011.

Rodríguez-Pacheco, R.L., Butlanska, J., Oliva, A.O., Muñoz-Moreno, A. Drying and wetting cycles in tailings dams: effects on physical, mechanical and hydraulic properties, 1-12, <https://doi.org/10.23967/isc.2024.324>

2.6. La situación actual de contaminación en las ramblas de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión

AUTORES: M. Nazaret González Alcaraz, Matías Ceacero-Moreno y José Álvarez-Rogel.

Departamento de Ingeniería Agronómica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica (ETSIA), UPCT.

2.6.1. Contexto geográfico y problemática debido a las antiguas actividades mineras

El distrito minero de Cartagena-La Unión se ubica en el extremo suroriental de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. El clima es Mediterráneo semiárido con precipitaciones anuales entre 200 y 300 mm, temperaturas medias en torno a los 17 °C y tasas de evapotranspiración de unos 857 mm anuales. La mayor parte de las lluvias se concentra en episodios cortos e intensos de elevada erosividad, lo que da lugar a que durante esos episodios los cursos de agua, habitualmente secos, transporten un elevado caudal y se produzcan importantes arrastres de sedimentos. La vegetación dominante en la zona está constituida por formaciones xerofíticas de porte arbustivo (p. ej., *Atriplex halimus*, *Helichrysum decumbens*, *Lygeum spartum*, *Rosmarinus officinalis*, *Stipa tenacissima*, *Anthyllis cytisoides*) y bosques de pino carrasco (*Pinus halepensis*) la mayoría de ellos de repoblación forestal y formaciones de *Tetraclinis articulata*, pero cuya única población en Europa se encuentra en esta sierra.

El territorio tiene una larga historia de explotación minera, que comenzó hace unos 2000 años. Los principales minerales que se han extraído son sulfuros tales como blenda (ZnS), pirita (FeS₂) y galena (PbS), aunque también se han extraído carbonatos como la cerusita (PbCO₃) y óxidos, hidróxidos y sulfatos de hierro (Conesa y Schulin, 2010). Hasta la segunda mitad del siglo XX la minería se basó en pequeñas explotaciones subterráneas. Sin embargo, a partir de las décadas de 1940-1950 el desarrollo de nuevos sistemas de extracción y explotación, como las modernas fundiciones y la separación por flotación diferencial, permitió mayor efectividad en las explotaciones y procesar cantidades mucho más altas de materiales, lo que provocó fuertes impactos ambientales (Figura 1). Esta actividad creció hasta la década de 1980 y luego fue decayendo hasta clausurarse en 1991 (Conesa y Schulin, 2010).



Figura 1. Panorámica de los impactos ambientales en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión.

Los cambios drásticos sufridos en el paisaje durante los años de minería siguen patentes en la actualidad debido a que las actuaciones de restauración han sido muy escasas. Según García-García (2004), en la zona aparecen canteras a cielo abierto, estériles de fundición, de corta, de concentración gravimétrica, de pozo y otros, que se encuentran en escombreras, terreras, gacheros, depósitos de almacenamiento de lodos de flotación (llamados depósitos mineros o balsas mineras) y otros. Como consecuencia de las actividades descritas, se estima que aproximadamente un 20% del total de los 50 km² de superficie del distrito minero se encuentran dañados por la presencia de residuos mineros. Esto afecta a cauces de ramblas, humedales y campos agrícolas y a ecosistemas cercanos de gran valor ecológico como el Mar Menor y algunos de sus humedales o el Mar Mediterráneo.

Hasta la fecha, las actuaciones de restauración en la zona han sido escasas. El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) de España, en el ámbito del MAPMM (2021-2026) (Marco de Actuaciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor), está llevando a cabo un conjunto de actuaciones encaminadas a la recuperación de las zonas afectadas por la minería en la cuenca del Mar Menor. Durante el periodo de ejecución se debería llevar a cabo la restauración ambiental de las principales ramblas afectadas por la minería, en especial la Rambla de Las Matildes, la Rambla del Beal, la Rambla de Ponce y la Rambla Carrasquilla (incluida en la Línea de Actuación 2.2.- Renaturalización y mejora ambiental de las Ramblas y creación de corredores verdes que doten de conectividad a toda la red de drenaje, en especial en las ramblas afectadas por la minería).

2.6.2. Muestreo y análisis de suelos y criterios de interpretación

Toma de muestras de suelo y métodos de análisis

Las muestras cuyos análisis se han utilizado para evaluar el estado de los suelos de las ramblas fueron recogidas por el personal de TRAGSATEC en los cauces de las ramblas del Miedo, Matildes, Ponce, Carrasquilla y el Beal. En todos los puntos se recogieron 2 muestras de suelo en el centro del cauce y, muchas veces, otras 2 en el margen derecho y 2 más en el izquierdo. En todas las ubicaciones, una de las muestras se recogió entre 0 y 30 cm de profundidad y la otra entre 30 a 60 cm. Las muestras se numeraron desde la cabecera a la desembocadura de cada rambla. Además, también se muestreó en el denominado Delta de Lo Poyo, en la zona de la desembocadura de la Rambla del Beal, que comprende parte de la finca de Lo Poyo y el saladar del mismo nombre. Para la interpretación de los resultados, se promediaron, para cada punto, los valores obtenidos en el centro y márgenes del cauce y a las dos profundidades de muestreo.

Las muestras fueron procesadas y analizadas por el laboratorio CAASA-GAMASER TECNOLOGÍA DEL AGUA, S.A., sin participación de los autores de este capítulo, que, por tanto, declinan toda responsabilidad en cuanto a los procedimientos empleados. Según el informe *Análítica de tomas de tierra en el entorno de la*

Sierra Minera del Mar Menor proporcionado por dicho laboratorio, los procedimientos fueron:

- **Conductividad eléctrica (CE) y pH.** Se realizaron en un extracto 1:5 suelo:agua. No obstante, el laboratorio no precisa si los extractos se hicieron con suelo tamizado a 2 mm (protocolo seguido en las metodologías habituales de análisis de suelos) o con muestras sin tamizar.
- **Concentración de elementos totales.** Se hizo una digestión ácida de las muestras (aunque el laboratorio no aportó detalles sobre el procedimiento) y posteriormente se midieron las concentraciones totales de Ba, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Tl, V y Zn por emisión atómica (ICP OES) y las de As, Se y Sb por fluorescencia atómica. No se realizaron determinaciones de fracciones solubles, biodisponibles o fraccionamiento geoquímico.
- Además, el laboratorio analizó la granulometría separando grava, arena y limo por tamizado.

Los autores sí son responsables de los criterios aplicados en la interpretación de los resultados, para lo cual se siguieron las indicaciones de Hazelton y Murphy (2016) para CE y pH y los niveles genéricos de referencia (NGR) para las concentraciones de los elementos medidos:

- **Conductividad eléctrica.** < 0,20: No salino / Salinidad muy baja; 0,21-0,40: Ligeramente salino / Salinidad baja; 0,41-0,70: Salino / Salinidad media; 0,71-1,20: Muy salino / Salinidad elevada; > 1,20: Extremadamente salino / Salinidad muy elevada.
- **pH.** > 8,50: Alcalino; 8,50 a 7,31: Básico; 7,30 a 6,61: Neutro; 6,60 a 5,51: Ligeramente ácido; 5,50 a 4,51: Ácido; 4,50 a 3,50: Extremadamente ácido; < 3,50: Hiper-ácido. Indicar que la solubilidad de la mayoría de los metales se incrementa notablemente a valores de pH inferiores a 5,5.
- **Elementos totales:** NGR establecidos para la Región de Murcia según los criterios que se explican a continuación.

Síntesis de los aspectos normativos. Criterios aplicados para evaluar los niveles de metales y metaloides en los suelos de las ramblas

No es el objetivo de este capítulo discutir en profundidad los criterios y normativas aplicados para considerar un suelo contaminado, pero sí se considera necesario indicar algunos aspectos generales para comprender los criterios que se han utilizado para interpretar los resultados.

A nivel del Estado español, el Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. El Decreto establece tres usos posibles a efectos de su aplicación: uso industrial del suelo (actividades industriales, excluidas las agrarias y ganaderas), uso urbano del suelo (construcción de viviendas, oficinas, equipamientos y dotaciones de servicios, y para la realización de actividades recreativas y deportivas) y otros usos del suelo (incluye desarrollo de actividades agrícolas, forestales y ganaderas). El Real Decreto indica que debe evaluarse el riesgo para la salud humana o bien para los ecosistemas y establece los criterios a seguir. Los aspectos relativos a la aplicación de los criterios incluidos en dicho Real Decreto se encuentran en la Guía Técnica de Aplicación del RD 9/2005 cuyo propósito es la puesta en práctica del decreto, exponiendo aspectos sobre la metodología aplicada para el cálculo de **Niveles Genéricos de Referencia (NGR)** de sustancias contaminantes. Los NGR se definen en el Artículo 2 del Real Decreto como la *concentración de una sustancia contaminante en el suelo que no*

conlleve un riesgo superior al máximo aceptable para la salud humana o los ecosistemas.

El Real Decreto indica que el cálculo de los NGR debe ser el resultado de aplicar una serie de criterios que incluyen desde aspectos relacionados con la concentración total de cada elemento, a los riesgos ecotoxicológicos evaluados según procedimientos estandarizados como son las Guías Estandarizadas de la OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). No obstante, cuando, por razones técnicas o de otra naturaleza, no sea practicable aplicar estos criterios, el Real Decreto indica que *las Comunidades Autónomas que no dispongan de niveles genéricos de referencia para metales podrán adoptar los resultados de sumar a la concentración media el doble de la desviación típica de las concentraciones existentes en suelos de zonas próximas no contaminadas y con sustratos geológicos de similares características. A efectos de evaluación de la contaminación del suelo, los valores así calculados para metales serán únicos y, por tanto, aplicables a cualquier uso del suelo y atendiendo tanto a la protección de la salud humana como a la protección de los ecosistemas.* Cuando se alude al contenido de metales en suelos de zonas próximas no contaminadas y con sustratos geológicos de similares características se está refiriendo a los **Niveles de Fondo (NF)**. Por tanto, se admite como válido el siguiente cálculo: $NGR = \text{media del NF} + 2 \text{ veces la desviación típica del NF}$.

Por tanto, una de las claves para establecer si un suelo está o no contaminado es determinar los NGR para los metales objeto de la evaluación. A este respecto, para interpretar los datos de contenidos de metales y metaloides en los suelos de las ramblas se han seguido los **NGR para la Región de Murcia** recogidos en el estudio de Martínez-Sánchez y Pérez-Sirvent (2007). Estas autoras dividieron la Región en cuatro zonas y establecieron cuatro grupos de suelos en función de la composición mineralógica predominante. No obstante, la Sierra Minera de Cartagena-La Unión quedó excluida del estudio citado, por lo que no hay NF ni NGR para ella. Esto tiene cierto sentido, ya que los NF se refieren a *concentraciones existentes en suelos de zonas próximas no contaminadas y con sustratos geológicos de similares características* y los suelos de la Sierra Minera están afectados, en mayor o menor medida, por la contaminación generada durante los periodos de actividad minera.

Ante la ausencia de NGR para la Sierra Minera, en este trabajo se ha optado por aplicar los NGR para el Campo de Cartagena. Asumimos que esto puede acarrear cierta imprecisión ya que muchos de los

materiales geológicos de la Sierra Minera son diferentes a los del Campo de Cartagena. No obstante, todas las ramblas analizadas discurren, en sus tramos medios y bajos, por el Campo de Cartagena, lo que justifica utilizar los NGR para esta zona como valores umbral de referencia. En cuanto a los grupos mineralógicos, se ha optado por promediar los NGR establecidos para los grupos 3 (con calcita como mineral predominante) y 4 (con cuarzo, dolomita y filosilicatos como minerales predominantes). Para Fe, Mn, Mb y V, Martínez-Sánchez y Pérez-Sirvent (2007) no habían establecido NGR, por lo que se buscó la información existente de otras comunidades autónomas de España, promediándose los valores establecidos para Madrid (BOCM-2006-20400 y BOCM-2007-09800), Cataluña (BOE-A-2009-17181), País Vasco (BOE-A-2015-8272), Navarra (BOE-A-2018-8953), Baleares (BOE-A-2019-5577), Asturias (BOPA-2014-06617), Extremadura (DECRETO-49-2015-15040054), Cantabria (NGR-CANTABRIA. D_22_2007), La Rioja (<https://www.larioja.org/medio-ambiente/es/residuos/suelo>), Galicia (Macías y Calvo de Anta, 2009) y Aragón (BOA 06/06/2008 9331).

Para todos los casos se han utilizado los niveles asignados en **Otros Usos**, que, como se ha indicado, incluyen usos aptos para el desarrollo de actividades agrícolas, forestales y ganaderas. Dentro de *Otros Usos*, se han utilizado los NGR de **riesgo para la salud humana** y para el **medio ambiente o la protección de los ecosistemas**, que casi siempre coinciden debido a que los NGR están calculados a partir de los NF.

Cuando se muestran las concentraciones en los suelos de las ramblas, se indican los NGR establecidos para cada elemento evaluado. Hay que indicar que las concentraciones totales de Ba, Co, Cr, Mo, Ni, Sb, Se y V no se han incluido en esta publicación ya que sus concentraciones estuvieron siempre, o prácticamente siempre, por debajo de los correspondientes NGR (Ba = 1358 mg kg⁻¹; Co = 18,5 mg kg⁻¹; Cr = 90,5 mg kg⁻¹; Mo = 16,5 mg kg⁻¹; Ni = 47,0 mg kg⁻¹; Se = 1,65 mg kg⁻¹; Sb = 1,5 mg kg⁻¹; V = 98 mg kg⁻¹). Tampoco se ha incluido el Li, por no contar con NGR para este elemento, ni el Fe, por ser un elemento habitual en todos los suelos, contaminados o no, en muy alta concentración.

Forma de presentación e interpretación de los resultados

Los datos para cada rambla están numerados desde la cabecera hasta la desembocadura. Cuando existen varios ramales en las ramblas, se han ido ordenando éstos uno a continuación del otro, nombrándolos como Tramo 1A, 1B, 1C, etc., hasta llegar al tramo común en el que confluyen, que se ha identificado como Tramo 2. Cada tramo se ha identificado por un símbolo y un color diferentes. En el caso del Delta de Lo Poyo la manera de presentar los datos es distinta (explicación detallada en apartado 7). En todos los casos se han incluido figuras identificando los tramos en las imágenes de Google Earth utilizando, para los puntos de muestreo, los mismos colores que en los gráficos. Cuando se hace mención a algún lugar se utiliza la toponimia que aparece en Google Earth. Por tanto, se asume que puede existir alguna imprecisión con el nombre de algún lugar, fundamentalmente las minas o los lavaderos de mineral.

En los gráficos se han incluido los promedios para cada punto y la desviación estándar, así como ciertos valores indicativos de umbrales que marcan diferencias entre condiciones geoquímicas (p. ej., umbrales de acidez y salinidad). También se han incluido los NGR de los elementos analizados. Para los casos en que la concentración esté por encima del NGR se asume un riesgo inherente *per se* para la salud humana y para el medio ambiente o la protección de los ecosistemas, debido al posible arrastre de partículas de suelo por el agua y el viento, que pueden alcanzar zonas urbanas y agrícolas, masas de agua, etc., además de poder ser inhaladas e ingeridas por la fauna y las personas.

Los datos para cada rambla se han descrito de manera muy sucinta, ya que, en prácticamente todos los casos, se sobrepasan los NGR. Posteriormente, en el apartado 8, se ha discutido el posible comportamiento de los elementos analizados para el conjunto de la zona, fundamentalmente en cuanto al riesgo de solubilización, movilización y biodisponibilidad, y las posibles opciones para paliarlos, apoyándonos en la bibliografía científica disponible de la zona.

2.6.3. Suelos de la Rambla del Miedo

Tramos establecidos

En la Rambla del Miedo los puntos de muestreo se han designado como *Mi* seguido de un número. En

este cauce se tomaron muestras en 50 puntos. Se establecieron tres tramos en la parte alta (Tramos 1A, 1B y 1C) y un tramo en la parte media-baja (Tramo 2) (**Figura 2**).



Figura 2. Tramos establecidos en la Rambla del Miedo. Rojo: Tramo 1A; Verde: Tramo 1B; Rosa: Tramo 1C; Azul: Tramo 2. El último número que aparece en todos los puntos de muestreo indica el número de muestras de suelo recogidas y analizadas en dicho punto (ver apartado 2.1).

Evaluación del pH y la CE

La **Figura 3** muestra los valores medios de pH y CE para la Rambla del Miedo. La mayor parte de los puntos de muestreo ubicados en el Tramo 1A son ácidos a extremadamente ácidos, excepto los puntos Mi30, Mi28, Mi27 y Mi48 que están entre ácido y neutro, y el Mi26 y Mi25 que van de neutro a básico. En cuanto al Tramo 1B, los valores medios de pH indican que se trata de suelos ácidos (puntos Mi50 y Mi49) y extremadamente ácidos (puntos Mi37 y Mi36). En cuanto al Tramo 1C, los suelos son extremadamente ácidos (puntos Mi47, Mi46, Mi45 y Mi44) y ácidos a neutros (puntos Mi43 a Mi38). En los tres tramos citados existen depósitos mineros que almacenan residuos de pH ácido (IGME, 2011). Dichos residuos aparecen en algunos casos en los taludes, como ocurre en algunos depósitos de la zona del Cabezo Rajao (Tramo 1A) o en la Cuesta de Las Lajas (Tramo 1B) que se cubrieron con material "limpio", o en todo el depósito, como ocurre en el depósito Descargador 1 (Tramo 1C), que se encuentra completamente expuesto. En el Tramo 2 los valores medios de pH son prácticamente siempre neutros o básicos. En casi todos los casos, los suelos de la rambla son muy salinos a extremadamente salinos.

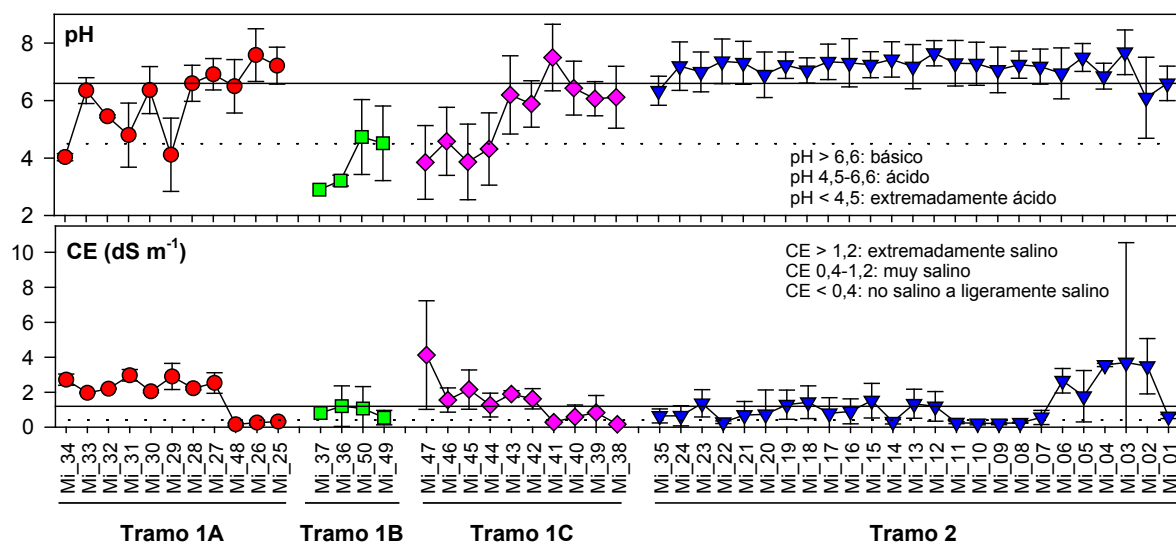


Figura 3. Valores de pH y conductividad eléctrica (CE) para los tramos establecidos en la Rambla del Miedo. Rojo: Tramo 1A; Verde: Tramo 1B; Rosa: Tramo 1C; Azul: Tramo 2. Los valores son las medias $\pm$ desviación estándar ($n = 2$ a 6). Las líneas continua y discontinua indican los umbrales indicados de pH y CE.

Contenidos en metales y As

La **Figura 4** muestra las concentraciones totales de metales y As en las muestras analizadas en la Rambla del Miedo. El Cd, Cu, Pb y Zn están siempre por encima de los NGR y el Mn por debajo o muy cercano

al NGR en Tramo 1B y en algunos puntos de Tramo 1A. Existe mayor riesgo de movilización de metales en el Tramo 1B y gran parte de los Tramos 1A y 1C debido a la acidez y la elevada CE que indica riesgo de formación de eflorescencias salinas. Las concentraciones de Tl estuvieron siempre por encima del NGR,

por lo que es necesario estudiar su comportamiento biogeoquímico en la zona. El As se encontró siempre por encima del NGR, con riesgo de lixiviación, sobre todo, en el Tramo 2 de pH neutro-básico. Por tanto,

basándonos en las concentraciones y los NGR, se puede decir que existe riesgos para la salud humana y/o el medio ambiente y los ecosistemas en todo el cauce de la rambla.

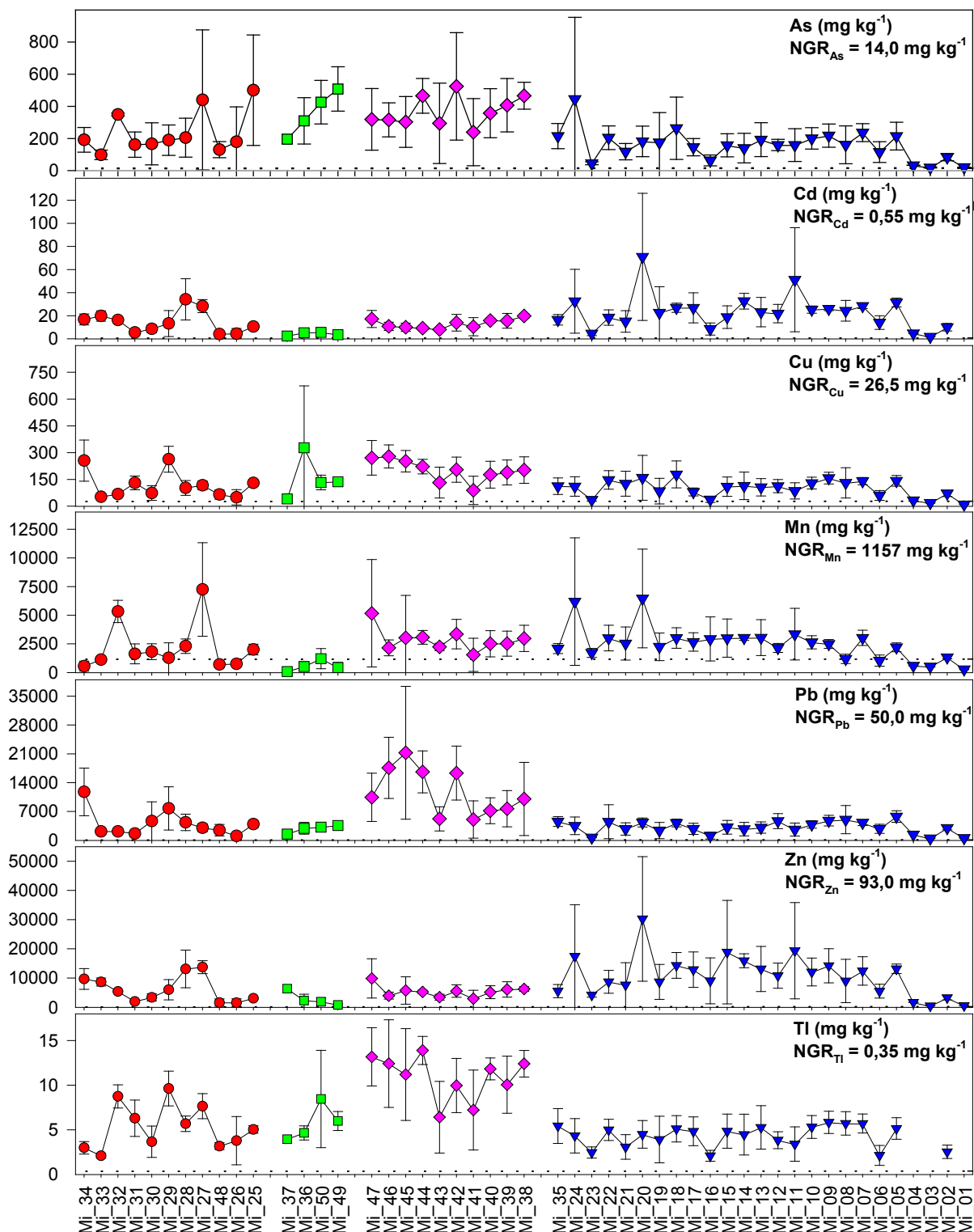


Figura 4. Concentraciones de As, Cd, Cu, Mn, Pb, Zn y Tl para los tramos establecidos en la Rambla del Miedo. Rojo: Tramo 1A; Verde: Tramo 1B; Rosa: Tramo 1C; Azul: Tramo 2. Los valores son las medias $\pm$ desviación estándar ($n = 2$ a 6). La línea discontinua indica el NGR para cada elemento.

2.6.4. Suelos de la Rambla de las Matildes

Tramos establecidos

En la Rambla de las Matildes los puntos de muestreo se han designado como Ma seguido de un número (Figura 5). En este cauce se han establecido dos tramos en la parte alta (Tramos 1A y 1B) y un tramo en la parte media-baja (Tramo 2).

Evaluación del pH y la CE

Los valores de pH y CE para los suelos analizados en la Rambla de las Matildes se muestran en la Figura 6. En los Tramos 1A y 1B los valores medios de pH indican que se trata de suelos ácidos. La extrema acidez de los residuos mineros almacenados en los depósitos Descargador 1 y 2 (IGME, 2011) dan lugar a la acidificación del cauce cuando son arrastrados aguas abajo. En cuanto al Tramo 2, entre los puntos de muestreo Ma24 y Ma19 predominan los pH ácidos, en muchos casos, muy cerca del umbral de los extremadamente ácidos (excepto en el punto Ma17). A partir del punto Ma18, y hasta la desembocadura de la rambla en el Mar Menor, los valores medios de pH oscilan alrededor del umbral entre ácido y neutro, con cierta variabilidad debido a que, en casi todos los puntos, algunas de las muestras tuvieron valores menores de 6,60.

La salinidad es bastante variable tanto dentro de los tramos como entre ellos, incluso a veces dentro de un

mismo punto de muestreo (como indican los altos valores de desviación estándar), pero la mayoría de los suelos muestran valores de CE en el rango de salinidad elevada (de 0,40 a 1,20 dS m⁻¹) o extrema (> 1,20 dS m⁻¹).

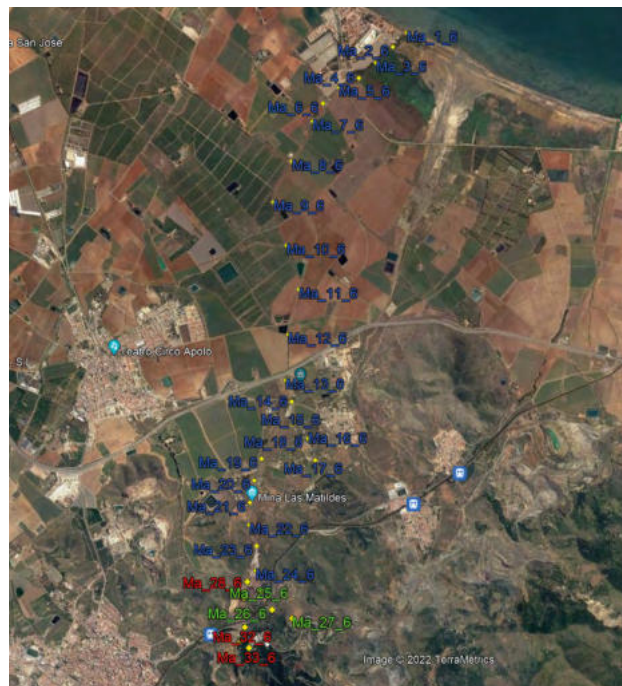


Figura 5. Tramos establecidos en la Rambla de las Matildes. Rojo: Tramo 1A; Verde: Tramo 1B; Azul: Tramo 2. El último número que aparece en todos los puntos de muestreo indica el número de muestras de suelo recogidas y analizadas en dicho punto (ver apartado 2.1).

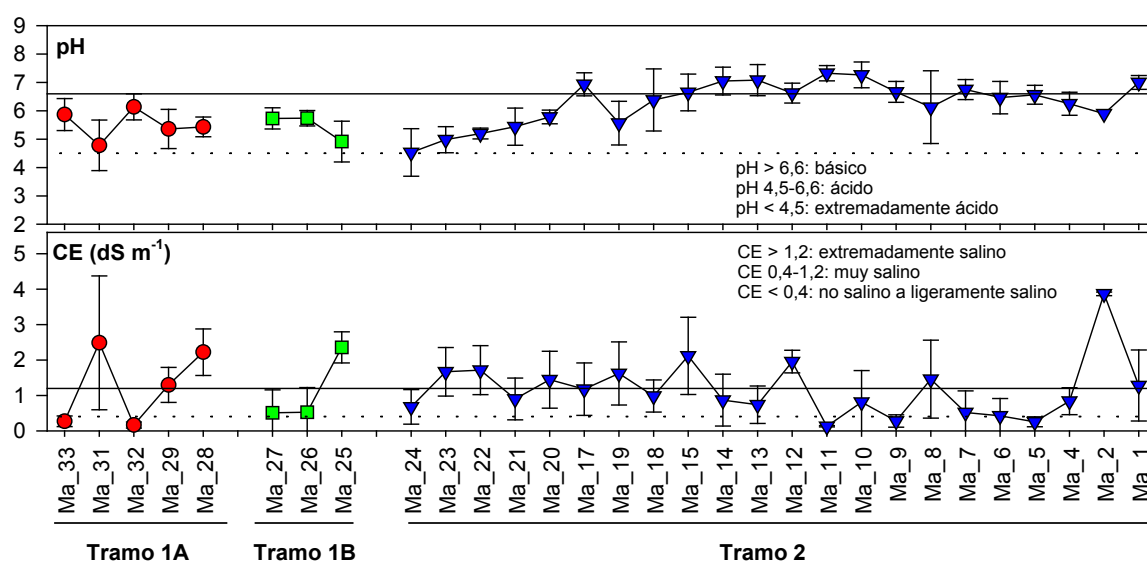


Figura 6. Valores de pH y conductividad eléctrica (CE) para los tramos establecidos en la Rambla de las Matildes. Rojo: Tramo 1A; Verde: Tramo 1B; Rosa: Tramo 1C; Azul: Tramo 2. Los valores son las medias ± desviación estándar (n = 2 a 6). Las líneas continua y discontinua indican los umbrales indicados de pH y CE.

Contenidos en metales y As

La **Figura 7** muestra las concentraciones totales de todos los elementos evaluados. El Cd, Cu, Mn, Pb y Zn están todos por encima de los NGR. El mayor riesgo de movilización de metales existe en los tramos 1A, 1B y el tramo 2 (hasta puntos Ma18 - Ma19) debido a la acidez predominante y a la formación de eflorescencias salinas (como se desprende de la ele-

vada CE). Las concentraciones de TI están siempre por encima del NGR, por lo que es necesario estudiar su comportamiento biogeoquímico en la zona. En cuanto al As, siempre es superior al NGR, con mayor riesgo de lixiviación a partir de punto Ma15 debido al pH neutro-básico. Por tanto, basándonos en las concentraciones y los NGR, se puede decir que existe riesgos para la salud humana y/o el medio ambiente y los ecosistemas en todo el cauce de la rambla.

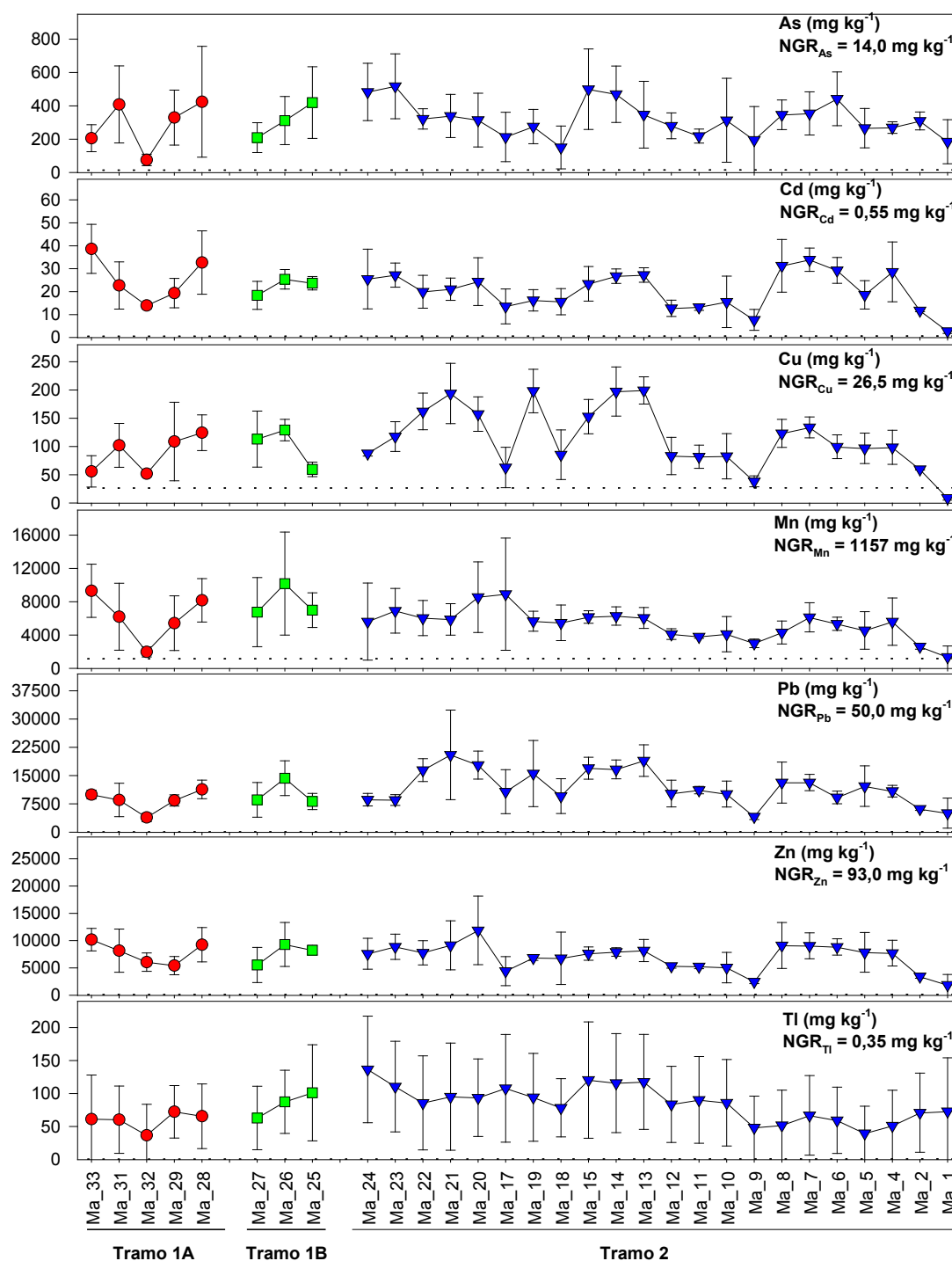


Figura 7. Concentraciones de As, Cd, Cu, Mn, Pb, Zn y TI para los tramos establecidos en la Rambla de las Matildes. Rojo: Tramo 1A; Verde: Tramo 1B; Rosa: Tramo 1C; Azul: Tramo 2. Los valores son las medias $\pm$ desviación estándar ($n = 2$ a 6). La línea discontinua indica el NGR para cada elemento.

2.6.5. Suelos de la Rambla del Beal

Tramos establecidos

En la Rambla del Beal los puntos de muestreo se han designado como Be seguido de un número (**Figura 8**). En este cauce se han establecido tres tramos en la parte alta (Tramos 1A, 1B y 1C) y un tramo en la parte media-baja (Tramo 2).

Evaluación del pH y la CE

Los valores de pH y CE para los suelos analizados en la Rambla del Beal se muestran en la **Figura 9**. Del total de las muestras analizadas, 61 tienen pH < 4,50 y 149 entre 4,50 y 6,60. Del total de muestras de las tomadas, sólo siete arrojan valores de pH mayores de 6,60. En el Tramo 1A los valores más bajos de pH (siempre entre 2,20 y 3,60) se observan en los puntos Be23 y Be22, ubicados en el entorno de la mina Segunda Paz. En el Tramo 1B el punto Be33, ubicado unos 200 m al norte de la mina Mentor, presenta valores de pH entre 2,80 y 5,60. En el Tramo 1C el punto con las muestras más ácidas es el Be38 (entre 3,70 y 6,0), situado entre las localidades del Estrecho de San Ginés y El Beal. En el Tramo 2, las muestras recogidas en el punto Be14 (junto a la localidad de El Beal) tienen valores de pH entre 2,50 y 4,70 y las recogidas en el punto Be7 (situado unos

300 m aguas abajo del cementerio de San Ginés de la Jara) entre 2,30 y 6,0.

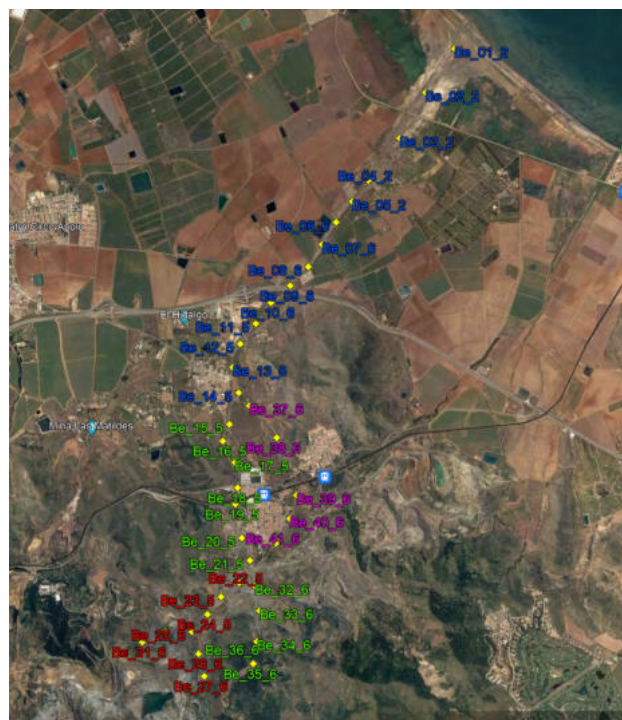


Figura 8. Tramos establecidos en la Rambla del Beal. Rojo: Tramo 1A; Verde: Tramo 1B; Rosa: Tramo 1C; Azul: Tramo 2. El último número que aparece en todos los puntos de muestreo indica el número de submuestras de suelo recogidas y analizadas en dicho punto (ver apartado 2.1).

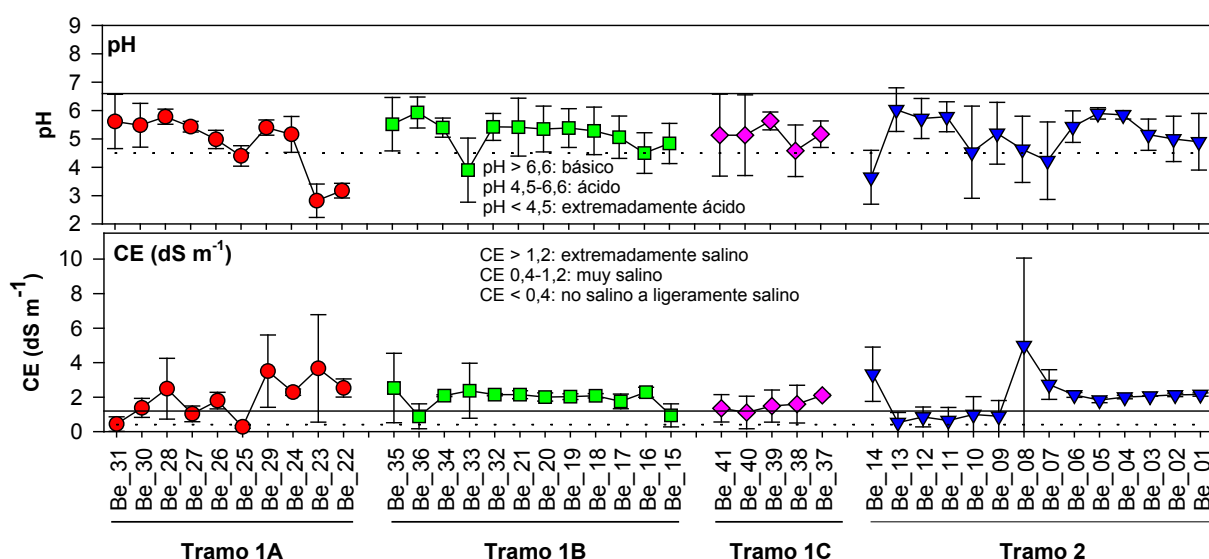


Figura 9. Valores de pH y conductividad eléctrica (CE) para los tramos establecidos en la Rambla del Beal. Rojo: Tramo 1A; Verde: Tramo 1B; Rosa: Tramo 1C; Azul: Tramo 2. Los valores son las medias $\pm$ desviación estándar ($n = 2$ a 6). Las líneas continua y discontinua indican los umbrales indicados de pH y CE.

Contenidos en metales y As

La **Figura 10** muestra las concentraciones totales de todos los elementos evaluados. El Cd, Cu, Mn, Pb y Zn están todos por encima de los NGR y, debido a la acidez y a la muy probable formación de eflorescencias salinas (como se desprende de la elevada CE), existe alto riesgo de movilización de estos elementos. El As también está siempre por encima del NGR, aunque

el riesgo de lixiviación puede ser relativamente bajo debido a la acidez tan pronunciada, aunque habría que evaluar dicha lixiviación en detalle. Igual que con otros elementos, el As puede acumularse en eflorescencias salinas y dispersarse con facilidad. Por tanto, basándonos en las concentraciones y los NGR, se puede decir que existe riesgos para la salud humana y/o el medio ambiente y los ecosistemas en todo en cauce de la rambla.

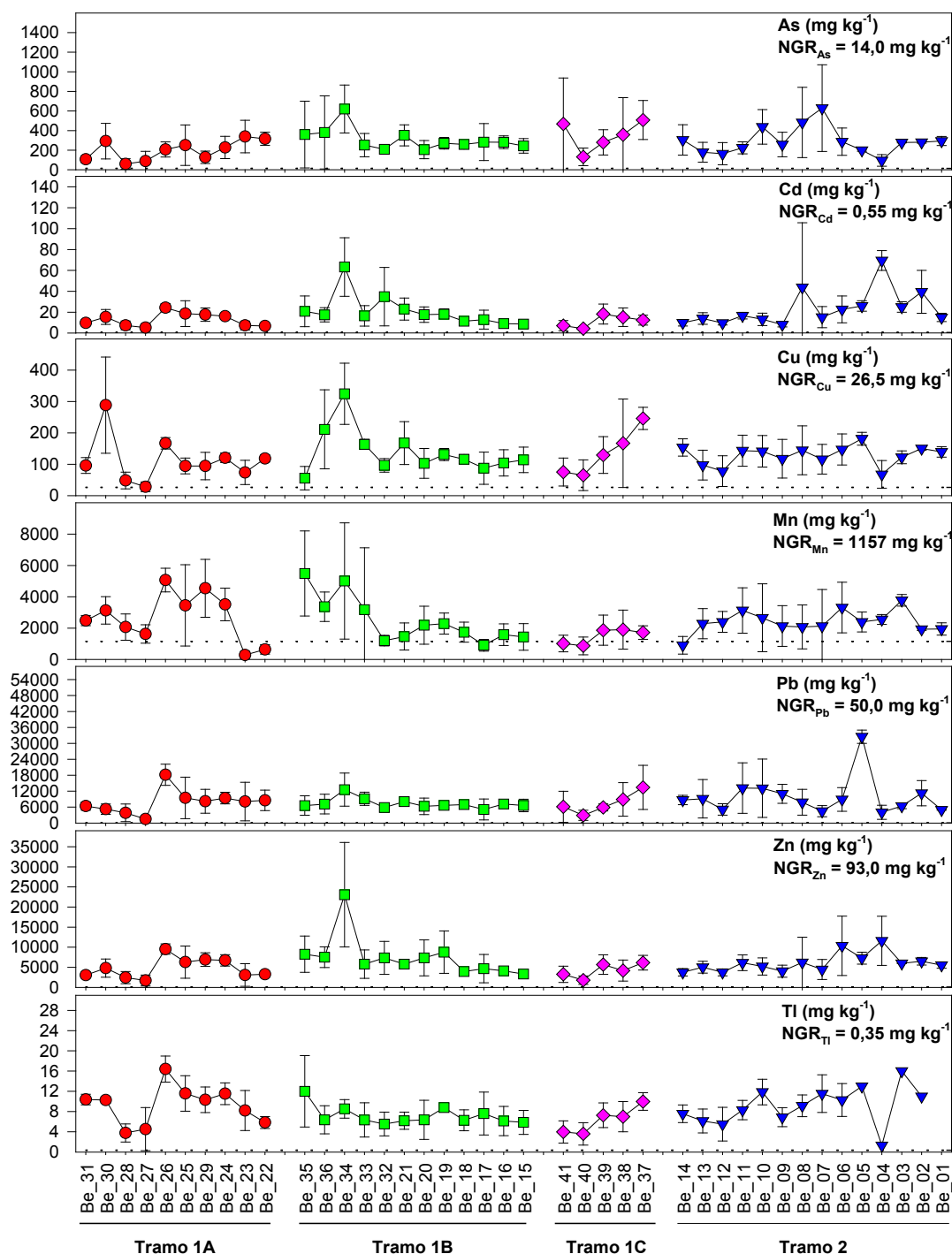


Figura 10. Concentraciones de As, Cd, Cu, Mn, Pb, Zn y TI para los tramos establecidos en la Rambla del Beal. Rojo: Tramo 1A; Verde: Tramo 1B; Rosa: Tramo 1C; Azul: Tramo 2. Los valores son las medias $\pm$ desviación estándar (n = 2 a 6). La línea discontinua indica el NGR para cada elemento.

2.6.6. Suelos de la Rambla de la Carrasquilla

Tramos establecidos

En la Rambla de la Carrasquilla los puntos de muestreo se han designado como Ca seguido de un número (Figura 11). En este cauce se han establecido dos tramos en la parte alta (Tramos 1A y 1B) y, a partir del punto en que éstos se unen, un tramo en la parte media-baja (Tramo 2).

Evaluación del pH y la CE

La Figura 12 muestra los valores de pH y CE para los suelos analizados en la Rambla de la Carrasquilla. En el Tramo 1A se diferencian claramente dos sectores. Desde la cabecera de la rambla hasta pasado los depósitos mineros de Mercader (puntos Ca36 a Ca32), a lo largo del Barranco de Magreros, los valores de pH están casi siempre por debajo de 6,0, aunque hay valores de 4,50 y otros de 7,0. En esta zona la acidez proviene de los arrastres de los depósitos mineros, fundamentalmente debido a la oxidación de sulfuros en los bordes de los depósitos y en los taludes, ya que las superficies son mayoritariamente de pH neutro (IGME, 2011; Álvarez-Rogel et al., 2022). A partir de ese punto se van alternando puntos con valores cercanos a pH 7,0 con otros cercanos a 6,0, pero no más bajos (excepto en el punto de muestreo Ca30 en el que dos muestras tienen valores de 3,50 y 4,20). El Tramo 1B es bastante homogéneo, con valores de pH entre 5,50 y 7,0, excepto en dos de las muestras del punto Ca40 (en la base del depósito minero El Lirio) que tienen un pH entre 4,40 y 5,0. Aunque en algunas zonas de El Lirio el pH es neutro (Álvarez-Rogel et al., 2022), gran parte son residuos ácidos (IGME, 2011), lo que ha lleva-

do a la acidez del cauce por arrastres aguas abajo. Con respecto al Tramo 2, hasta el punto de muestreo Ca8, la mayoría de las muestras tienen valores de pH entre 6,50 y 7,0, habiendo incluso muchas de ellas con valores de 8,0 a 8,50. Los puntos de muestreo Ca2, Ca5, Ca6, Ca7, Ca1, Ca3 y Ca4 corresponden al pequeño delta que se forma en la desembocadura de la rambla en el Mar Menor y aquí los valores de pH son algo más bajos, con siete muestras de pH entre 6,20 y 6,50, cinco muestras entre 6,60, y 7,0, y seis muestras entre 7,10 y 7,70.

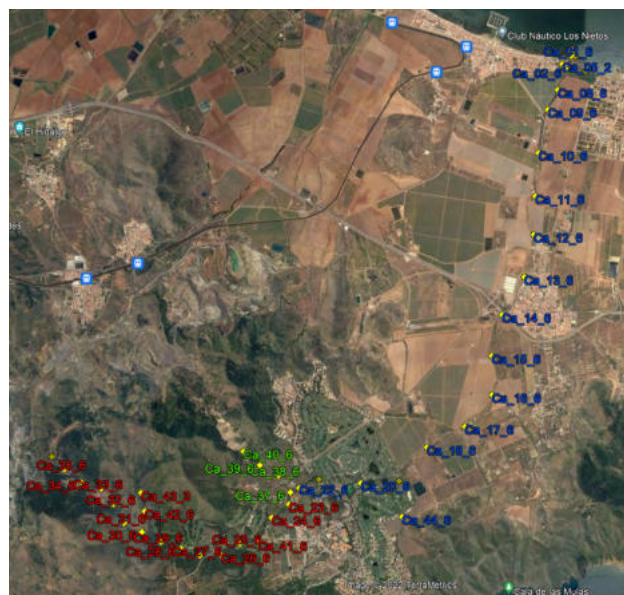


Figura 11. Tramos establecidos en la Rambla de la Carrasquilla. Rojo: Tramo 1A; Verde: Tramo 1B; Azul: Tramo 2. El último número que aparece en todos los puntos de muestreo indica el número de submuestras de suelo recogidas y analizadas en dicho punto (ver apartado 2.1).

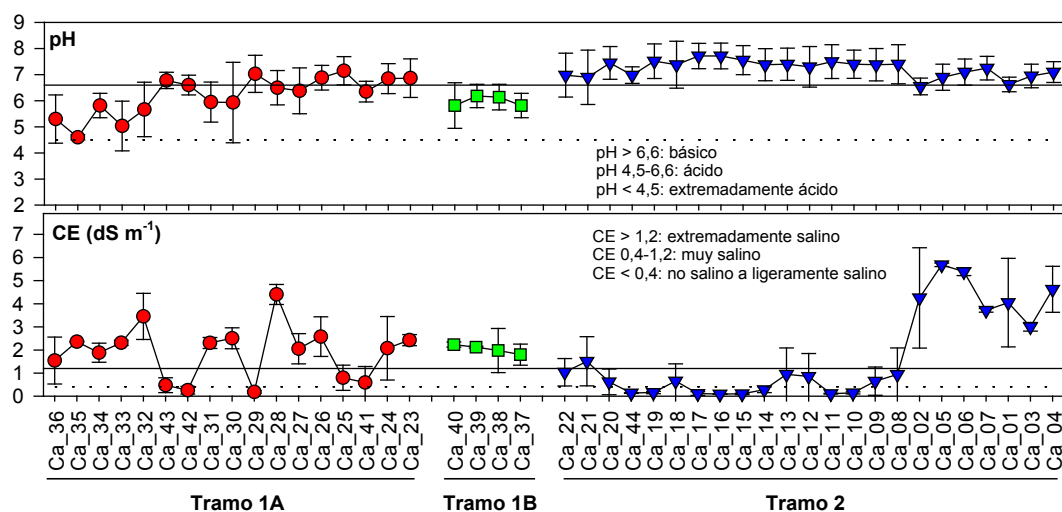


Figura 12. Valores de pH y conductividad eléctrica (CE) para los tramos establecidos en la Rambla de la Carrasquilla. Rojo: Tramo 1A; Verde: Tramo 1B; Rosa: Tramo 1C; Azul: Tramo 2. Los valores son las medias $\pm$ desviación estándar ($n = 2$ a 6). Las líneas continua y discontinua indican los umbrales indicados de pH y CE.

Contenidos en metales y As

La Figura 13 muestra las concentraciones totales de todos los elementos evaluados. El Cd, Mn, Pb y Zn están siempre por encima de los NGR, mientras que el Cu supera al NGR en los Tramos 1A y 1B y está por debajo en el Tramo 2. Existe mayor riesgo de movilización de metales en los Tramos 1A y 1B debido a la acidez predominante y a la formación de eflorescencias salinas (como se desprende de la elevada CE). Las concentraciones de TI están por encima del NGR, lo que hace necesario estudiar su comportamiento biogeoquímico en la zona. El As también está siempre por encima del NGR. El riesgo de lixiviación del

metaloide en los Tramos 1A y 1B es menor debido a la acidez predominante, pero pueden acumularse en las eflorescencias salinas y dispersarse. En el Tramo 2 se espera mayor riesgo de movilización de As debido al pH neutro-básico. Por tanto, basándonos en las concentraciones y los NGR, se puede decir que existe riesgos para la salud humana y/o el medio ambiente y los ecosistemas en toda la rambla. Hay que indicar que, a fecha de redacción de este trabajo, se están desarrollando los trabajos de encapsulado del depósito minero El Lirio y que, por tanto, se espera que los riesgos de dispersión de elementos potencialmente peligrosos almacenados en dicho depósito desaparezcan una vez finalizados dichos trabajos.

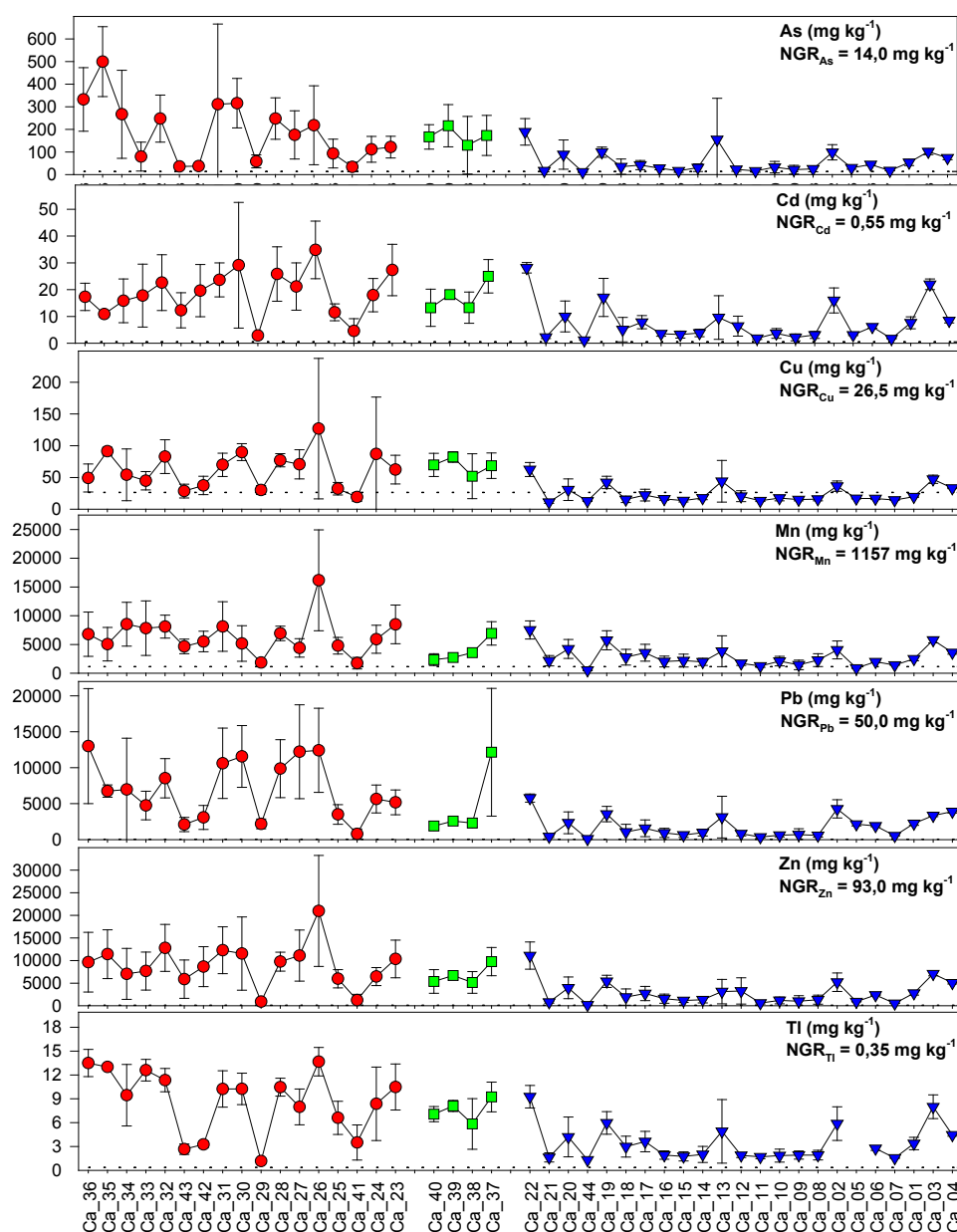


Figura 13. Concentraciones de As, Cd, Cu, Mn, Pb, Zn y TI para los tramos establecidos en la Rambla de la Carrasquilla. Rojo: Tramo 1A; Verde: Tramo 1B; Rosa: Tramo 1C; Azul: Tramo 2. Los valores son las medias $\pm$ desviación estándar ($n = 2$ a 6). La línea discontinua indica el NGR para cada elemento.

2.6.7. Suelos del Delta de Lo Poyo

Tramos establecidos

Para el Delta de Lo Poyo los puntos de muestreo se han designado como DP seguido de un número (**Figura 14**). El Delta de Lo Poyo se ubica en la desembocadura de la Rambla del Beal. Dicha rambla se ha desbordado en diversas ocasiones antes de llegar al Mar Menor, esparciendo los residuos mineros que

arrastra a zonas anexas al cauce. A diferencia de lo que sucede en las ramblas, donde las muestras se fueron recogiendo a lo largo del cauce, aquí se recogieron más o menos en perpendicular a él y en zonas con usos del suelo o ambientes distintos. Por este motivo se ha seguido un criterio diferente a la hora de presentar los resultados e interpretarlos, sectorizando la zona en función de los usos o ambientes.



Figura 14. Ubicación de los puntos de muestreo en el Delta de Lo Poyo. Gris: Sector 1; Amarillo: Sector 2; Azul claro: Sector 3; Azul oscuro: Sector 4. El último número que aparece en todos los puntos de muestreo indica el número de submuestras de suelo recogidas y analizadas en dicho punto (ver apartado 2.1).

Denominamos Sector 1 al ubicado en las zonas del entorno de la Finca Lo Poyo, aguas arriba de la carretera RM-F54. En este sector se han recogido muestras en varias parcelas agrícolas actualmente sin cultivar. Como Sector 2 se ha considerado el cauce de la Rambla del Beal, en el tramo que atraviesa el Saladar de Lo Poyo. A ambos lados del cauce y en dirección noroeste a sureste, en la parte central del Saladar de Lo Poyo, se encuentra el que denominamos Sector 3, que comprende las antiguas salinas. Este sector ocupa la mayor superficie del saladar y queda limitado por la Rambla de las Matildes en el extremo septentrional y la Rambla de Ponce en el meridional. Gran parte del Sector 3 está desprovisto de vegetación, pero en otras zonas se desarrolla un carrizal denso de *Phragmites australis* y, en algunos sectores, un almarjal. Es importante indicar también que hay zonas

con gran proliferación de la caña común (*Arundo donax*), lo cual es achacable a las filtraciones de agua del acuífero, que es relativamente poco salina en comparación con la salinidad del lugar. La estrecha franja de dunas que recorre el saladar de norte a sur entre el Sector 2 y la línea de costa se ha identificado como Sector 4. Estas dunas están muy alteradas y contienen gran cantidad de residuos mineros.

Evaluación del pH y la CE

La **Figura 15** muestra los valores de pH y CE para los suelos del Delta de Lo Poyo. El hecho de que la mayoría tengan pH ácido es una evidencia clara de que se ven afectados por los residuos mineros arrastrados por la Rambla del Beal, ya que los suelos natu-

rales del entorno son de pH neutro-básico e incluso alcalino. También puede haber afectación debido a los residuos arrastrados por las Rambla de Las Matildes (en el extremo norte del saladar) y la Rambla de Ponce (en el extremo sur del saladar), aunque estos residuos no son tan ácidos como los arrastrados por

la Rambla del Beal. Incluso el cordón de dunas está severamente afectado, excepto en la parte más meridional, en los ≈ 700 m más cercanos a la población de Los Nietos, donde hay una cobertura vegetal con especies típicas de dunas en estado de conservación relativamente bueno.

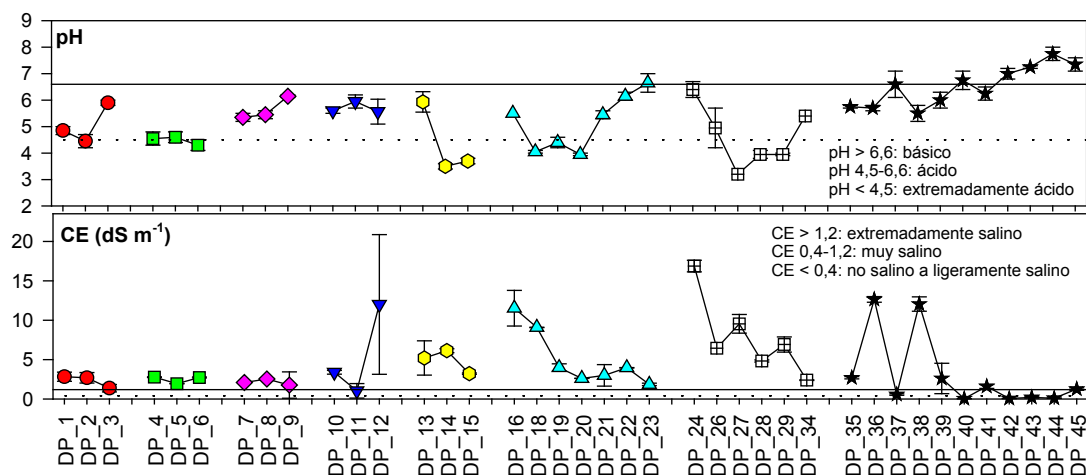


Figura 15. Valores de pH y conductividad eléctrica (CE) para los tramos establecidos en la Rambla de la Carrasquilla. Rojo: Tramo 1A; Verde: Tramo 1B; Rosa: Tramo 1C; Azul: Tramo 2. Los valores son las medias $\pm$ desviación estándar ($n = 2$ a 6). Las líneas continua y discontinua indican los umbrales indicados de pH y CE.

En general los suelos son salinos a extremadamente salinos, excepto en algunos puntos del sector más meridional de las dunas (puntos DP40, DP42, DP43 y DP44). Es lógico que la CE sea elevada en un saladar, ya que por definición es un ambiente salino, y más si está situado cerca del mar, donde el agua subterránea salina se encuentra cerca de la superficie debido a la intrusión marina. No obstante, en este caso, la salinidad está fuertemente influida por la presencia de residuos mineros depositados por la Rambla del Beal. En las ramblas, el sulfato (SO_4^{2-}) abunda sobre todo en las partes altas de los cauces debido a la oxidación de los sulfuros presentes en las rocas y los suelos. Estos sulfatos forman

eflorescencias salinas en superficie que contienen elevadas concentraciones de metales y metaloides (García-Lorenzo et al., 2012; Alcolea, 2015). Esto constituye un grave riesgo de dispersión de contaminantes en el Delta de Lo Poyo, mayor si cabe que en los tramos altos de las ramblas, debido a que junto al Mar Menor hay más facilidad para que las sales asciendan por capilaridad a la superficie debido a que el agua subterránea está a muy poca profundidad. De hecho, es habitual observar eflorescencias salinas en la zona, sobre todo en verano, que son fácilmente transportadas por el viento formando nubes de polvo (Figura 16), lo que se ve favorecido por el paso de personas y vehículos.



Figura 16. Nubes de polvo en suspensión en el Saladar de Lo Poyo durante los meses de verano debido al arrastre de partículas de suelo y de las eflorescencias salinas que se forman en la superficie.

Contenidos en metales y As

La **Figura 17** muestra las concentraciones de metales y As en los suelos del Delta de Lo Poyo. Como se aprecia, Cd, Mn, Pb y Zn siempre están por encima de los NGR. El Cu también está por encima del NGR excepto en parte del cordón de dunas (Sector 4, puntos DP42 a DP45). En la zona existe alto riesgo de movilización de metales debido a la acidez, y dicho riesgo aumenta debido a la alternancia de periodos de inundación y desecación (o sea, condiciones de hidromorfía variable) y la movilidad de las sales. Por tanto, en esta zona hay ne-

cesidad de elevar el pH, pero también de estabilizar el potencial de oxidación-reducción (Eh) manteniendo un nivel de humedad elevado y constante. Así, la hidromorfía permanente y adición de biochar podrían ayudar a reducir la movilización de metales, pero es imprescindible trabajar por microambientes geoquímicos y utilizar medidas específicas en cada uno, sin generalizar. El TI también está por encima del NGR y su comportamiento debe ser estudiado más en detalle. Basándonos en las concentraciones y los NGR, se puede decir que existen riesgos para la salud humana y/o el medio ambiente y los ecosistemas en todo del Delta de Lo Poyo.

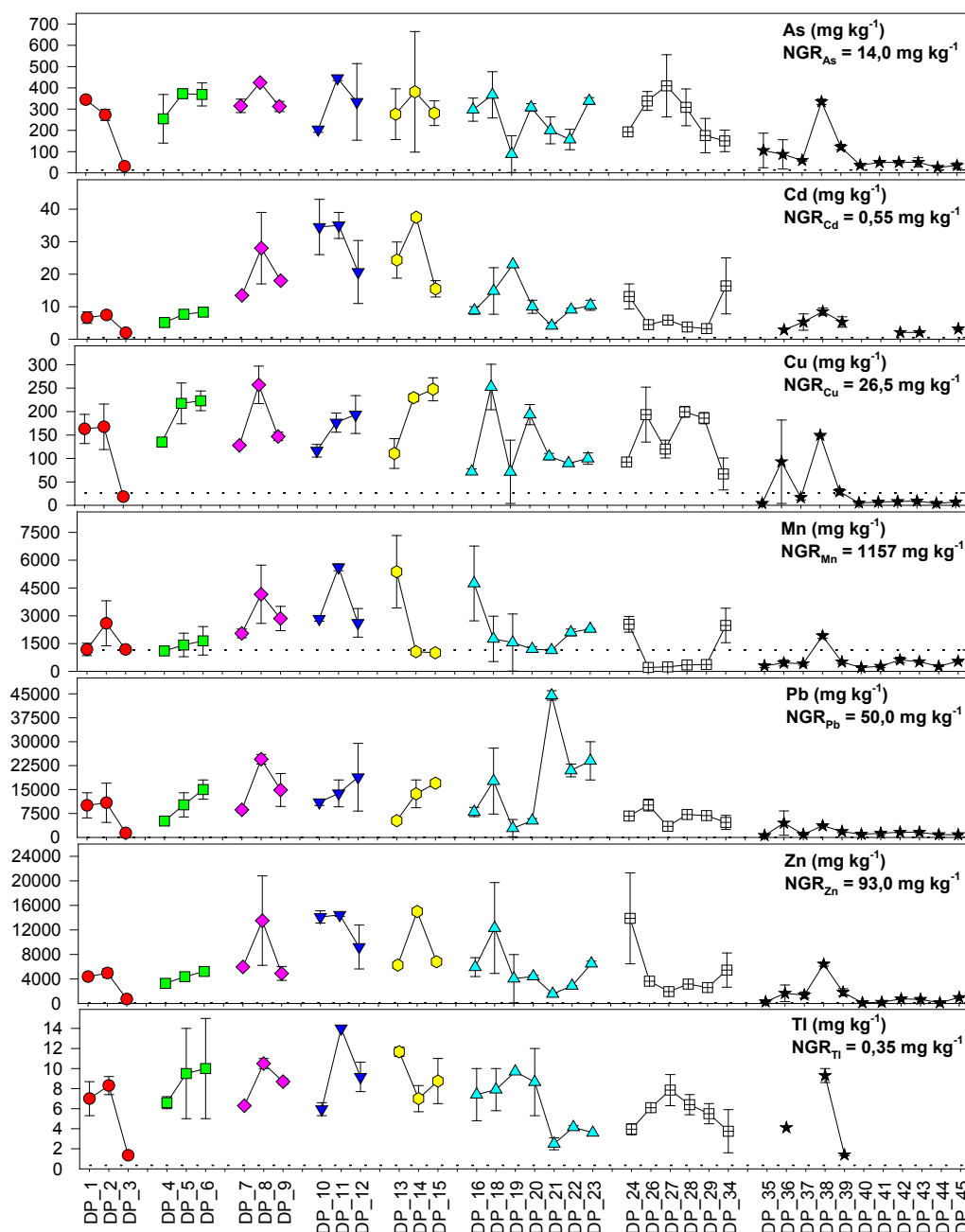


Figura 17. Concentraciones de As, Cd, Cu, Mn, Pb, Zn y TI para los tramos establecidos en el Delta de Lo Poyo. Rojo: Tramo 1A; Verde: Tramo 1B; Rosa: Tramo 1C; Azul: Tramo 2. Los valores son las medias $\pm$ desviación estándar ($n = 2$ a 6). La línea discontinua indica el NGR para cada elemento.

2.6.8. Una síntesis sobre el comportamiento biogeoquímico de As, Cd, Cu, Mn, Pb, Zn y Tl. Riesgos en las ramblas y posibles medidas correctoras

Arsénico (As)

La movilidad del As está condicionada por gran número de factores, lo que hace imprescindible conocer la variabilidad de condiciones biogeoquímicas que pueden darse en una localidad si se pretende evaluar los riesgos de solubilización y lixiviación de este elemento. Los factores que ejercen una mayor influencia en la movilidad del As son el Eh, el pH, la granulometría, el contenido en materia orgánica, la naturaleza de los minerales y la presencia de iones que puedan competir por los sitios de unión con este metaloide. Los niveles más bajos de As soluble se presentan en suelos con un alto contenido en arcilla, limo, óxidos de Fe/Al y calcita, pues el As tiende a unirse a estos componentes del suelo (Prohaska y Stinger, 2005). Por lo general, la solubilidad del As aumenta en suelos bien aireados, fundamentalmente cuando se trata de suelos de textura gruesa (arenosos o franco-arenosos), como son los de las ramblas de la Sierra Minera (si nos atenemos a los datos de granulometría proporcionados por el laboratorio que analizó las muestras). Por el contrario, su movilidad disminuye en suelos encharcados y/o de textura fina (arcillosos o limosos). Además, la solubilidad del As se incrementa bien al subir el pH por encima de 7, al aumentar la concentración de oxianiones solubles, bien con un pH por debajo de 5, al aumentar la solubilidad de las especies ligadas a los óxidos de Fe/Al (Pais y Jones, 2000). En plantas las concentraciones de As varían ampliamente ($\approx 0,009$ y $\approx 1,7$ mg kg⁻¹), considerándose que puede haber efectos tóxicos con concentraciones por encima de $\approx 2-10$ mg kg⁻¹ (Pais y Jones, 2000). El As se encuentra incluido en el grupo I de sustancias cancerígenas de la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, 1987), lo que implica que existen suficientes evidencias sobre sus efectos cancerígenos en personas. Para humanos la dosis de referencia oral se estima en 0,3 µg kg día⁻¹ (USEPA 2001; RIVM, 2004) y en aguas de bebida no debe superarse una concentración de 10 µg L⁻¹.

Conesa et al. (2008) analizaron la especiación del As en residuos mineros de pH ácido procedentes del entorno de la mina Belleza y de pH neutro del entorno de la Rambla del Avenque. Estos autores encontraron que a pH ácido: ≈ 5 % del As se encontraba en formas

fácilmente movilizables (soluble en agua y adsorbido al complejo de cambio); ≈ 10 % unido a óxidos de Mn y óxidos amorfos de Fe; y ≈ 40 % unido a óxidos cristalinos de Fe. En residuos de pH neutro los porcentajes fueron del ≈ 12 % en formas fácilmente movilizables; ≈ 37 % unido a óxidos de Mn y óxidos amorfos de Fe; y ≈ 23 % unido a óxidos cristalinos de Fe. La formación de eflorescencias salinas, una circunstancia bastante habitual en la zona como se puede observar a simple vista y que está apoyada por los datos de CE, es un factor de riesgo. A este respecto, Alcolea (2015) encontró concentraciones medias de ≈ 425 mg kg⁻¹ de As en dichas eflorescencias e indicó que $\approx 5,5$ % de dicho As es fácilmente lixiviable cuando las eflorescencias se disuelven con la lluvia.

Como generalidad, se puede decir que el uso de enmiendas que contengan óxidos de Fe y biochar puede ayudar a disminuir la movilidad del As (Simón et al., 2015). No obstante, una vez más hay que incidir en que las medidas necesarias para disminuir los riesgos asociados a la movilización de As se deben implantar en función de las características específicas de cada tramo de cada rambla o de cada zona de los saladares, ya que la variabilidad de las condiciones biogeoquímicas y la facilidad para la movilización del metaloide bajo condiciones muy diversas imposibilitan establecer una actuación común a todos ellos.

Cadmio (Cd), cobre (Cu), manganeso (Mn), plomo (Pb), cinc (Zn) y talio (Tl)

En general, estos elementos aumentan su solubilidad a pH ácido, pero hay aspectos importantes que se deben comentar ya que otros parámetros pueden influir también en su movilidad.

Cadmio (Cd)

Los factores más importantes que controlan la movilidad del Cd son el pH y el Eh (Kabata-Pendias, 2000). La solubilidad del Cd aumenta en medio ácido, mientras que la adsorción a arcillas, materia orgánica y óxidos e hidróxidos de Fe y Al se incrementa al au-

mentar el pH. Bajo condiciones de Eh en el rango de la sulfato-reducción ($Eh < +100$ mV), el Cd permanece altamente inmovilizado como CdS. Sin embargo, en condiciones ácidas oxidantes, el CdS se disuelve, liberando Cd soluble (Kirk, 2004). No obstante, en condiciones oxidantes con $pH > \approx 7.5$, es probable la formación de minerales como CdO, $CdCO_3$ y $Cd_3(PO_4)_2$, permaneciendo el Cd inmovilizado. Por otro lado, en suelos salinos se favorece la solubilidad del Cd al formar diferentes complejos solubles con el anión cloruro (Kabata-Pendias, 2000). En agua dulce la concentración de referencia es de $0,2 \mu g L^{-1}$, mientras que en agua de mar es de $\approx 0,001$ a $\approx 0,038 \mu g L^{-1}$. En plantas la concentración está entre $\approx 0,1$ y $\approx 1 mg kg^{-1}$, con un valor de referencia de $0,05 mg kg^{-1}$ (Pais y Jones, 2000).

En el estudio de Conesa et al. (2008) se determinó que para residuos mineros de pH ácido procedentes del entorno de la mina Belleza ≈ 75 % del Cd se encontraba en formas fácilmente movilizables, mientras que en residuos de pH neutro del entorno de la Rambla del Avenque fue de ≈ 45 %. En otro estudio, Conesa y Párraga (2022) analizaron residuos mineros de $pH \approx 7,3$ de uno de los depósitos mineros de Mercader y encontraron que ≈ 25 % del Cd se encontraba en formas fácilmente movilizables, mientras ≈ 50 % estaba ligado a óxidos de Fe y Mn. En el mismo trabajo extrajeron agua de poro de macetas experimentales y encontraron $\approx 1,2 mg L^{-1}$ de Cd. La elevada salinidad que existe, en general, en todo el cauce de la rambla supone un riesgo añadido, ya que el Cd gana movilidad en presencia de sales solubles. Además, en las zonas de la rambla donde se formen eflorescencias salinas el riesgo se acentúa. Alcolea (2015) encontró concentraciones medias de $\approx 143 mg kg^{-1}$ de Cd en dichas eflorescencias. El 53 % del Cd de estas eflorescencias es fácilmente lixiviable cuando éstas se disuelven con la lluvia (Alcolea, 2015), lo que supone una importante vía de dispersión de este elemento.

En un estudio de lixiviación en columnas experimentales, Simón et al. (2010) determinaron que el carbonato cálcico redujo la movilidad del Cd, pero no lo suficiente para disminuir su toxicidad. En otro estudio, Álvarez-Rogel et al. (2018) probaron la efectividad del biochar procedente de podas de árboles y de lodos de depuradora para disminuir las concentraciones de Cd soluble en agua de poro en residuos mineros procedentes de la zona. De estos trabajos se deduce que para disminuir la movilidad del Cd en los suelos ácidos de la rambla puede ser necesario combinar varias estrategias, en función de las condiciones geoquímicas de cada tramo o sector.

Cobre (Cu)

El Cu^{2+} puede adsorberse al complejo de intercambio catiónico del suelo y a óxidos metálicos, particularmente a los óxidos de Fe y Mn (hematites, goethita, birnesita) (Kabata-Pendias, 2000; Artiola, 2005). Tiene menos movilidad que otros elementos en los suelos (Kabata-Pendias, 2000), debido a que el aumento de solubilidad de algunas especies inorgánicas de Cu cuando baja el pH se ve contrarrestado por la formación de ciertos complejos insolubles (Moreno-Grau, 2003). En anaerobiosis pueden formarse precipitados estables de ferrita cuprosa ($Cu_2Fe_2O_4$). Bajo condiciones reductoras extremas y pH ácido, la presencia de Cu metálico (Cu^0) es posible, coexistiendo con la ferrita cuprosa y minerales del Fe como la magnetita (Fe_3O_4). En ambientes anaerobios ricos en sulfuros, pueden formarse precipitados de sulfuros de Cu, como por ejemplo la calcocita (estable) y la covellita (metaestable) coexistiendo con la ferrita cuprosa. Estos sulfuros, en condiciones aerobias, se oxidarán liberando iones Cu^+ , Cu^{2+} y sulfato (Artiola, 2005). En un amplio rango de pH, las formas solubles de Cu más comunes son los quelatos orgánicos de bajo peso molecular (Kabata-Pendias, 2000). Además, puede formar fuertes quelatos con las sustancias húmicas (ácidos fúlvicos y húmicos), disminuyendo significativamente su movilidad en los suelos orgánicos. En suelos neutros o alcalinos donde existen cantidades significativas de carbonatos y sulfatos, el $CuCO_3$, $CuSO_4$, así como el Cu^{2+} y $Cu(OH)_2$, pueden ser abundantes (Artiola, 2005).

Aunque no se ha analizado el contenido en materia orgánica en las muestras objeto de este trabajo, no se espera que contengan elevadas cantidades, por lo que no es esperable que este sea un factor que participe activamente en la dinámica del Cu en los suelos de las ramblas. Con respecto a las arcillas, no se espera que contribuyan de forma importante a la retención de Cu en los suelos analizados, dada la textura gruesa de los suelos de las ramblas. Por tanto, serían los óxidos e hidróxidos de Mn y Fe (ambos elementos son muy abundantes) los que, a priori, tendrían un papel destacado en la retención de Cu (no se ha analizado el contenido de Al en las muestras recogidas). Esto estaría de acuerdo con el trabajo de Conesa et al. (2008), en particular para residuos de pH neutro-básico donde se encontró ≈ 46 % del Cu ligado a óxidos de Fe. Para residuos ácidos estos autores, así como González-Alcaraz et al. (2013b), encontraron ≈ 12 % asociado a óxidos de Fe. Para ambos tipos de residuos, el papel de los óxidos de Mn en la retención de Cu parece ser poco relevante (Conesa et al., 2008; González-Alcaraz et al., 2013b).

Manganeso (Mn)

Aunque el Mn es un elemento muy móvil a pH ácido, puede permanecer soluble con facilidad en un amplio rango de pH-Eh, incluyendo pH neutro y Eh indicativo de condiciones óxicas a subóxicas. Por tanto, dadas las elevadas concentraciones de Mn en la mayoría de las muestras analizadas y la existencia de pH ácidos en muchas de ellas, sobre todo en los tramos de cabecera, es esperable encontrar elevadas concentraciones de Mn soluble. Esto, a su vez, puede llevar a la liberación de elementos retenidos en los óxidos de Mn, contribuyendo a aumentar la disponibilidad de otros elementos potencialmente tóxicos. Allí donde el pH sea neutro a básico, disminuirá el riesgo de solubilización del Mn. Conesa y Párraga-Agua (2022) analizaron residuos mineros del depósito Mercader con pH 7,40 y determinaron que $\approx 5\%$ del Mn estaba fácilmente movilizable y otro $\approx 75\%$ estaba en forma de óxidos, lo que puede facilitar su disolución si baja el pH.

Plomo (Pb)

En condiciones aerobias el Pb es adsorbido químicamente en la arcilla y óxidos de Fe y Mn. Forma complejos con la materia orgánica, especialmente con los grupos funcionales que contienen S. Además, puede formar hidróxidos, carbonatos, sulfatos y fosfatos insolubles, cuya presencia es mayor conforme el pH aumenta. La solubilidad del Pb es muy limitada y solamente se eleva de forma considerable en condiciones de acidez acusada. En condiciones fuertemente reductoras precipita como PbS altamente insoluble (Kirk, 2004). En presencia de materia orgánica disuelta el Pb puede formar complejos solubles, constituyendo una fracción móvil importante de este metal en suelos de pH neutro (Moreno-Grau, 2003). En humanos se considera que hay toxicidad por Pb a partir de dosis de $\approx 1 \text{ mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y se considera letal a dosis de $10 \text{ g kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$. La dosis de referencia por ingestión oral de Pb para un análisis de riesgos se ha establecido en $0,0036 \text{ mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (RIVM, 2001) y la concentración de referencia por inhalación en $0,0006 \text{ mg m}^{-3}$ (RIVM, 2001).

En los suelos de las ramblas analizados no se espera que la retención de Pb en las arcillas tenga un papel relevante, dado que son de textura gruesa. Por tanto, serían los óxidos de Fe y Mn (ambos elementos son muy abundantes) los que, a priori, tendrían un papel destacado en la retención de Pb. Esto estaría de acuerdo con el trabajo de Conesa et al. (2008) en el que encontraron que, en residuos mineros de pH ácido procedentes de la mina Belleza, $\approx 10\%$ de Pb estaba como fácilmente

cambiable (soluble en agua y de cambio) y $\approx 25\%$ unido a óxidos de Fe y Mn. En residuos de pH neutro de la zona del Barranco del Avenque los porcentajes fueron $\approx 7\%$ de Pb como fácilmente cambiable y $\approx 28\%$ unido a óxidos de Fe y Mn. Álvarez-Rogel et al. (2018) obtuvieron $\approx 50\text{-}60\%$ de Pb ligado a óxidos de Fe y Mn tanto en residuos de ácidos (pH $\approx 5,0\text{-}6,0$) procedentes de depósitos mineros en la cabecera del Barranco del Avenque como en residuos básicos (pH $\approx 7,50$) procedentes de los depósitos de Mercader. Alcolea (2015) encontró una concentración media de $\approx 4210 \text{ mg kg}^{-1}$ de Pb en estas eflorescencias, que pueden disolverse durante las lluvias y lixiviar Pb debido a la acidez de los suelos de la rambla o ser arrastradas por el viento, lo que supone un riesgo añadido.

Cinc (Zn)

El Zn presenta un amplio espectro de pH en el que sus compuestos son solubles, por lo que es uno de los metales más móviles. Con pH < 7 la solubilidad aumenta pues se incrementa el grado de disociación del Zn de los complejos orgánicos insolubles y disminuye su adsorción a las superficies de la matriz sólida (Moreno-Grau, 2003). A pH ≥ 7 la solubilidad comienza a disminuir, en particular a partir de pH $\geq \approx 8$, precipitando como carbonato o hidroxycarbonato (Kirk, 2004). No obstante, tiene afinidad por unirse a ligandos orgánicos solubles, lo que puede mantenerlo en la solución a pesar de la subida de pH. La movilidad del Zn aumenta en aguas salobres, debido a la competencia con otros cationes, como los alcalinotérreos, por los centros adsorbentes, provocando la desorción de este elemento. Bajo condiciones fuertemente reductoras forma sulfuros insolubles como la blenda (ZnS), limitando drásticamente su movilidad (Moreno-Grau, 2003). Sin embargo, puede volver a liberarse y solubilizarse en condiciones ácidas y oxidantes que favorecen la disolución de los sulfuros (Kabata-Pendias, 2000; Jacob y Otte, 2003). En agua dulce puede aparecer en concentraciones de hasta $\approx 240 \mu\text{g L}^{-1}$ y en agua de mar entre $\approx 0,05$ y $\approx 0,1 \mu\text{g L}^{-1}$. Contenidos elevados de Zn son fitotóxicos para muchas especies, aunque existe un amplio rango de concentraciones en el suelo que podrían causar problemas, de ≈ 70 a 400 mg kg^{-1} , según las propiedades físico-químicas del medio que intervienen en su solubilidad (Kabata Pendias y Pendias, 1992). En el hombre la concentración de referencia por ingesta oral para análisis de riesgos para la salud humana es de $0,3 \text{ mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (RIVM, 2001; USEPA, 2001).

En la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, tanto en residuos mineros de pH neutro-básico como de pH ácido, Conesa et al. (2008) encontraron $\approx 15\%$ del Zn en

formas fácilmente movilizables (soluble en agua y de cambio) y ≈ 55 % ligado a óxidos de Fe y de Mn. Aunque aparentemente las proporciones parecen indicar lo mismo, los óxidos se disuelven con más facilidad a pH ácido y, por tanto, el riesgo de liberación de Zn es más alto en condiciones de acidez que a pH neutro-básico. Álvarez-Rogel et al. (2018) encontraron, en condiciones óxicas, concentraciones de Zn soluble en agua de poro entre ≈ 100 y ≈ 200 mg kg⁻¹ en residuos mineros de pH $\approx 5,50$ - $6,50$ y concentraciones entre ≈ 1 y ≈ 4 mg kg⁻¹ en residuos mineros de pH $\approx 7,0$ - $8,0$. Hay que indicar también que el contenido de Zn en las eflorescencias salinas de sulfatos, comunes en muchas zonas de las ramblas, pueden alcanzar valores extremadamente elevados (≈ 23.000 mg kg⁻¹) (Alcolea, 2015). El 65 % del Zn de estas eflorescencias es fácilmente lixiviable cuando éstas se disuelven con la lluvia (Alcolea, 2015), lo que supone una importante vía de dispersión de este elemento.

Talio (Tl)

Existe escasa información sobre el comportamiento del Tl en el suelo. La movilidad del Tl⁺ disminuye cuando hay abundancia de materia orgánica ya que se pueden formar complejos con ésta, o cuando hay elevados contenidos de arcilla que retenga el ion en posiciones de cambio, o en presencia de óxidos e hidróxidos de Fe y Mn sobre los que precipita (Macías y Calvo de Anta, 2009). Con respecto a los dos primeros componentes, son muy escasos en estos residuos mineros por lo que no se espera que contribuyan a la retención de Tl. Con respecto a los óxidos e hidróxidos, la abundancia de Fe y Mn permite suponer que pueden tener un papel relevante en la retención de Tl. En cualquier caso, las concentraciones, en muchos casos, son superiores a las más altas citadas para suelos en la bibliografía (hasta ≈ 5 a ≈ 10 mg kg⁻¹) y se ha indicado riesgo de toxicidad en plantas a partir de ≈ 1 mg kg⁻¹ en el suelo, sobre todo en zonas ácidas. Por tanto, se asume que la abundancia de Tl puede suponer un riesgo para la biota y el ecosistema.

Arsénico (As), cadmio (Cd), manganeso (Mn), plomo (Pb) y cinc (Zn) en la Marina del Carmolí y el Saladar de Lo Poyo

Las zonas cercanas a la desembocadura de la Rambla del Miedo (puntos Mi4 a Mi1), ubicadas en el humedal de la Marina del Carmolí, así como las muestras del Delta de Lo Poyo, requieren un análisis aparte debido a las condiciones biogeoquímicas particula-

res que ocurren en estos enclaves a causa de los periodos de inundación-desección a los que se ven sometidos y la elevada salinidad por su cercanía al Mar Menor. Además, en el Delta de Lo Poyo existen extensas zonas de pH ácido, lo que facilita, como se ha comentado, la solubilización de los metales.

Arsénico (As)

María-Cervantes et al (2011) hicieron experimentos de inundación-desección en macetas durante 120 días con suelos de pH entre $\approx 6,0$ y $\approx 6,5$ recogidos en el Saladar de Lo Poyo. Estas muestras contenían ≈ 550 mg kg⁻¹ de As, pero de ellos sólo ≈ 25 mg kg⁻¹ estuvieron en formas fácilmente movilizables extraíbles con HCl 1N (ligadas a CaCO₃, sulfuros volátiles y/o óxidos e hidróxidos de Fe y Mn). La baja solubilidad del As en estos experimentos quedó patente por las escasas concentraciones del metaloide en el agua de poro, que no excedieron los ≈ 6 µg L⁻¹ a los 30 días de inundación. Además, las concentraciones tendieron a disminuir hasta prácticamente cero con la bajada del Eh hasta valores de ≈ 100 mV, pero se incrementaron en los periodos de desección del suelo hasta concentraciones de ≈ 4 - 6 µg L⁻¹. El comportamiento del As en los experimentos descritos corresponde con la dinámica de liberación de As por disolución de óxidos de Fe y Mn durante los primeros 30 días y su inmovilización posterior en forma de sulfuro, que al oxidarse durante las fases de secado se volvería a liberar. Por tanto, la inundación permanente bajo condiciones reductoras no muy severas puede ayudar a mantener el As inmovilizado, mientras que los cambios de estado reducción-oxidación pueden contribuir a movilizarlo. En caso de que se alcanzasen condiciones reductoras muy severas (Eh $\approx < -200$ mV) el As que se pudiera liberar podría permanecer en la solución como As elemental y formarse arsina (AsH₃) que es volátil y tóxica (Moreno-Grau, 2003).

Cadmio (Cd)

En el experimento de María-Cervantes et al. (2011) con suelos de Lo Poyo de pH ácido que estuvieron inundados durante 110 días sin adicionar enmiendas, las concentraciones de Cd en agua de poro alcanzaron los $\approx 2,5$ mg L⁻¹ los primeros días de inundación, pero disminuyeron hasta $\approx 0,5$ mg L⁻¹ a los 70 días y no volvieron a aumentar ni durante el periodo de inundación ni durante el secado posterior.

En el delta que se forma en la desembocadura de la rambla (puntos DP1 a DP7) el riesgo de movilización

de Cd se incrementa si se producen periodos alternantes de inundación-desección que generen cambios de Eh (María-Cervantes et al., 2010; González-Alcaraz et al., 2013a). Además, la presencia de altas concentraciones de Cl⁻ facilita la movilidad del metal.

Manganeso (Mn)

Los riesgos de movilización de Mn son muy elevados en todo el Delta de Lo Poyo, excepto en la parte más meridional de las dunas (puntos DP40 a DP45, Sector 4). Conesa et al. (2011) utilizaron EDTA para simular la biodisponibilidad de Mn en las diferentes zonas del Saladar de Lo Poyo y encontraron concentraciones entre ≈ 30 y ≈ 2200 mg kg⁻¹, lo que supuso entre un ≈ 10 y un ≈ 50 % de los contenidos totales. María-Cervantes et al. (2011) analizaron muestras de pH ácido del saladar de Lo Poyo sin adición de enmiendas y determinaron que ≈ 60 % del Mn estaba en formas fácilmente movilizables extraíbles con HCl 1N (ligadas a carbonato cálcico, sulfuros volátiles y/o óxidos e hidróxidos de Fe y Mn). Estos autores llegaron a obtener hasta ≈ 400 mg L⁻¹ de Mn en agua de poro, concentración que disminuyó hasta ≈ 50 mg L⁻¹ tras 100 días de inundación, sin que un periodo de secado de unos 30 días volviese a liberar el Mn. González-Alcaraz et al. (2011) y González-Alcaraz et al. (2013b) no encontraron un efecto positivo de una enmienda caliza para disminuir los contenidos de Mn soluble en agua de poro y sí un incremento de concentración del metal en la parte superficial de columnas de suelo durante periodos de secado debido su bombeo ascendente por parte de las plantas. De estos estudios se deduce que el Mn en los suelos del Saladar de Lo Poyo se encuentra en gran medida biodisponible para la biota, incluso a pH neutro-básico, y que las oscilaciones del Eh asociadas a cambios de las condiciones hídricas del suelo favorecen su movilidad, la cual está favorecida, además, por el efecto de las plantas.

En la Marina del Carmolí, en la zona de influencia de la Rambla del Miedo, Jiménez-Cárceles et al. (2006) encontraron concentraciones de Mn en agua de poro del suelo de entre ≈ 10 y ≈ 45 mg L⁻¹. Conesa et al. (2014) utilizaron para extraer Mn de suelos de la misma zona y obtuvieron concentraciones entre ≈ 165 y ≈ 920 mg kg⁻¹. María-Cervantes et al. (2010) trabajaron en macetas experimentales con suelos recogidos en las mismas ubicaciones, en los que simulaban periodos de inundación similares a los que ocurren en el humedal. Estos autores encontraron

concentraciones de Mn disuelto en agua de entre ≈ 5 y ≈ 17 mg L⁻¹ y observaron que dichas concentraciones disminuían a lo largo del tiempo, independientemente de si los suelos se mantenían permanentemente inundados o si sufrían alternancia de fases de inundación con otras de desecación. Debido a esto, concluyeron que los sulfuros formados durante las fases de inundación debían jugar un papel poco relevante en la inmovilización de Mn, ya que si hubiera sido así el metal se hubiera liberado de nuevo durante las fases de secado al oxidarse los sulfuros, como sucedió con el Cd, Pb, Zn y Cu.

Plomo (Pb)

Conesa et al. (2011) analizaron los contenidos de Pb extraíbles con EDTA en suelos de varias zonas del Saladar de Lo Poyo. Estos autores encontraron concentraciones totales de Pb entre ≈ 2400 y ≈ 18.400 mg kg⁻¹ y determinaron que del ≈ 10 al ≈ 35 % del Pb estaba en formas potencialmente biodisponibles. En el estudio de María-Cervantes et al. (2011) con suelos de Lo Poyo de pH ácido que estuvieron inundados durante 110 días sin adicionar enmiendas, estos autores encontraron concentraciones de Pb en agua de poro de hasta $\approx 0,3$ mg L⁻¹, que disminuyeron un ≈ 80 % tras unos 100 días de inundación. La inmovilización se atribuyó, sobre todo, a la formación de minerales de Fe tipo *green rust*, estables a un amplio rango de Eh, ya que no hubo aumento de concentración durante las fases de secado como se hubiera esperado si se hubieran formado sulfuros y éstos se hubieran oxidado.

Uso de enmiendas en los suelos de la Marina del Carmolí y el Saladar de Lo Poyo

Diversos trabajos de adición de enmiendas a los suelos afectados por metales de la Marina del Carmolí y el Saladar de Lo Poyo han demostrado que la efectividad de las enmiendas está modulada por las condiciones de hidromorfía y, por tanto, no se pueden asumir las mismas consideraciones que cuando se aplican las mismas enmiendas a suelos que no sufren periodos de inundación-desección.

En cuanto a la opción de añadir enmiendas carbonatadas, González-Alcaraz et al. (2013a, 2013b) ensayaron la adición de residuos de mármol a suelos afectados por residuos mineros neutro-básicos de la Marina del Carmolí y ácidos del Saladar de Lo Poyo, sometidos a condiciones de no inundación y de hidromorfía variable. Cuando trabajaron bajo condiciones de no inundación (González-Alcaraz et

al., 2011), encontraron concentraciones de Cd soluble en agua de poro de hasta $\approx 10 \text{ mg L}^{-1}$, de Pb de hasta $\approx 0,5 \text{ mg L}^{-1}$ y de Zn de hasta $\approx 50 \text{ mg L}^{-1}$. Tras adicionar carbonato cálcico como enmienda el pH se elevó hasta $\approx 6,50\text{-}7,0$ y las concentraciones se redujeron en un ≈ 98 , ≈ 90 y $\approx 50 \%$ respectivamente para los tres metales. Sin embargo, cuando usaron la misma enmienda con los mismos suelos, pero sometidos a condiciones de inundación-desección variables que simulaban subidas y bajadas del nivel freático, el efecto fue diferente (González-Alcaraz et al., 2013b; González-Alcaraz y van Gestel, 2017). La concentración de Cd en el agua de poro estuvo entre $\approx 0,5$ y $\approx 1,2 \text{ mg L}^{-1}$ y apenas se redujo por la adición de la enmienda, observándose un aumento del Cd ligado a fracciones fácilmente movilizables (soluble, de cambio, carbonatos y óxidos de Fe y Mn). Para el Pb las concentraciones en agua de poro fueron de $\approx 0,2 \text{ mg L}^{-1}$ y el carbonato cálcico las redujo hasta prácticamente no ser detectadas. Con el Zn las concentraciones iniciales en agua de poro fueron de $\approx 1,5$ a $\approx 2 \text{ mg L}^{-1}$ y el carbonato cálcico las redujo hasta $\approx 0,5 \text{ mg L}^{-1}$, pero a coste de

incrementarse el contenido en Zn ligado a óxidos amorfos de Fe, que pueden disolverse con facilidad en respuesta a la bajada del Eh. En todos estos experimentos se observó un aumento de la movilidad de los metales cuando se alternaron subidas y bajadas del nivel del agua, atribuibles a la formación de óxidos amorfos de Fe durante las fases de secado, que se solubilizan fácilmente durante las siguientes fases de inundación. Este efecto fue más evidente en presencia de plantas, que contribuyeron a bombear los metales y redistribuirlos en el perfil del suelo.

Posteriormente Álvarez-Rogel et al (2018) sometieron a residuos mineros de pH ácido ($\text{pH} \approx 5,0$) a ciclos simulados de subida y bajada del nivel freático con y sin adición de biochar como enmienda. El biochar elevó el pH hasta $\approx 6,50\text{-}7,0$, lo que disminuyó las concentraciones de Cd en agua de poro de ≈ 4 a $< \approx 0,4 \text{ mg L}^{-1}$, las de Pb de $\approx 2\text{-}3$ a $< \approx 1 \text{ mg L}^{-1}$ y las de Zn de ≈ 600 a $< \approx 20 \text{ mg L}^{-1}$. En ninguno de los casos se observó que los periodos de secado indujeran movilización de los metales.

Agradecimientos

M Nazaret González-Alcaraz es investigadora del programa Ramón y Cajal del Ministerio de Ciencia e Innovación de España (RYC2020-029322-I). M. Ceacero-Moreno tiene un contrato predoctoral cofinan-

ciado con fondos del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y la Universidad Politécnica de Cartagena.

Bibliografía

- Alcolea, L.A. 2015. Geoavailability of Ni, Cu, Zn, As, Cd, and Pb in the Sierra de Cartagena – La Unión (SE Spain). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena, España.
- Álvarez-Rogel, J., Peñalver-Alcalá, A., González-Alcaraz, M.N. 2022. Spontaneous vegetation colonizing abandoned metal(loid) mine tailings consistently modulates climatic, chemical and biological soil conditions throughout seasons. *Science of the Total Environment* 838, 155945. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155945>.
- Álvarez-Rogel, J., Tercero, M.C., Conesa, H., Párraga-Aguado, I., González-Alcaraz, M.N. 2018. Biochar from sewage sludge and pruning trees reduced porewater Cd, Pb and Zn concentrations in acidic, but not basic, mine soils under hydric conditions. *Journal of Environmental Management*, 223: 554-565.
- Artiola, J.F. 2005. Speciation of Copper: Speciation of Copper in the Environment. En: Cornelis, R., Caruso, J., Crews, H., Heumann, K. (Eds.), *Handbook of Elemental Speciation II: Species in the Environment, Food, Medicine and Occupational Health*. Wiley. Chichester, UK. pp. 174-186.
- Conesa, H.M., María-Cervantes, A., Álvarez-Rogel, J., González-Alcaraz, M.N. 2014. Role of rhizosphere and soil properties for the phytomanagement of a salt marsh polluted by mining wastes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11:1353-1364.
- Conesa, H.M., María-Cervantes, A., Álvarez-Rogel, J., González-Alcaraz, M.N. 2011. Influence of soil properties on trace element availability and plant accumulation in a Mediterranean salt marsh polluted by mining wastes: Implications for phytomanagement. *Science of the Total Environment*, 409: 4470-4479.
- Conesa, H.M., Párraga-Aguado, I. 2022. Effects on metal availability of the application of tree-biochar and municipal waste biosolid in a metalliferous mine tailings substrate. *Environmental Geochemistry and Health*, 44:1317-1327.

- Conesa, H.M., Robinson, B., Schulin, R., Nowack, B. 2008. Metal extractability in acidic and neutral mine tailings from the Cartagena-La Unión Mining District (SE Spain). *Applied Geochemistry*, 23: 1232-1240.
- Conesa, H.M., Schulin, R., 2010. The Cartagena-La Unión mining district (SE Spain): a review of environmental problems and emerging phytoremediation solutions after fifteen years research. *Journal of Environmental Monitoring*, 12: 1225-1233.
- García-García, C. 2004. Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia-España). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena, España.
- García-Lorenzo, M.L., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M.J., Molina-Ruiz, J. 2012. Trace elements contamination in an abandoned mining site in a semiarid zone. *Journal of Geochemical Exploration*, 113: 23-35.
- González-Alcaraz, M.N., Conesa, H.M., Álvarez-Rogel, J. 2013a. When liming and revegetation contribute to the mobilisation of metals: Learning lessons for the phytomanagement of metal-polluted wetlands. *Journal of Environmental Management*, 116: 72-80.
- González-Alcaraz, M.N., Conesa, H.M., Álvarez-Rogel, J. 2013b. Phytomanagement of strongly acidic, saline eutrophic wetlands polluted by mine wastes: The influence of liming and *Sarcocornia fruticosa* on metals mobility. *Chemosphere*, 90: 2512-2519.
- González-Alcaraz, M.N., Conesa, H.M., Tercero, M.C., Schulin, R., Álvarez-Rogel, J., Egea, C. 2011a. The combined use of liming and *Sarcocornia fruticosa* development for phytomanagement of salt marsh soils polluted by mine wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 186: 805-813.
- González-Alcaraz, M.N., van Gestel, C.A.M. 2017. Changes in soluble metal concentrations induced by variable water table levels as response to liming and *Phragmites australis* growth in metal-polluted wetland soils: Management effectiveness. *Geoderma*, 289: 20-28.
- Hazelton, P., Murphy, B. 2016. Interpreting soil test results: What do all the numbers mean? CSIRO publishing.
- IGME. 2011. Inventario de instalaciones mineras abandonadas o cerradas. Instituto Geológico y Minero de España.
- Jacob, D.L., Otte, M.L. 2003. Conflicting processes in the wetland plant rhizosphere: metal retention or mobilisation? *Water, Air, and Soil Pollution*, 3: 91-104.
- Jiménez-Cárceles, F.J., Álvarez-Rogel, J., Conesa-Alcaraz, H. 2008. Trace element concentrations in salt marsh soils strongly affected by wastes from metal sulphide mining areas *Water, Air and Soil Pollution*, 188: 283-295.
- Kabata-Pendias, A. 2000. Trace Elements in Soils and Plants. Third Edition. CRC Press. Boca Raton, Florida, EEUU.
- Kirk, G.J.D. 2004. The Biogeochemistry of Submerged Soils. Wiley. Chichester, UK.
- Macías Vázquez, F., Calvo de Anta, R. 2009. Niveles genéricos de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de Galicia. XUNTA DE GALICIA.
- María-Cervantes, A., Conesa, H.M., González-Alcaraz, M.N., Álvarez-Rogel, J. 2010. Rhizosphere and flooding regime as key factors for the mobilization of arsenic and potentially harmful metals in basic mining polluted salt marsh soils. *Applied Geochemistry*, 25: 1722-1733.
- María-Cervantes, A., Conesa, H.M., González-Alcaraz, M.N., Álvarez-Rogel, J. 2011. Mobilisation of As and trace metals in saline, acidic Spolic Technosols: the role of the rhizosphere and flooding conditions. *Journal of Soils and Sediments*, 11: 800-814.
- Martínez-Sánchez, M.J., Pérez-Sirvent, C. 2007. Niveles de fondo y niveles genéricos de referencia de metales pesados en suelos de la Región de Murcia. Secretaría Autonómica para la Sostenibilidad. Dirección General de Calidad Ambiental. Comunidad Autónoma de Murcia.
- Moreno-Grau, M.D. 2003. Metales. En: Moreno-Grau, M.D. (Ed.), *Toxicología Ambiental. Evaluación de riesgos para la salud humana*. McGraw-Hill. Madrid (España), pp. 198-235.
- Pais, I., Jones, J.B.Jr. 1997. The handbook of Trace Elements. St. Lucie Press. Boca Raton, Florida, EEUU.
- Prohaska, T., Stingeder, G. 2005. Speciation of Arsenic: Arsenic and Arsenic Species in Environment and Human Nutrition. En: Cornelis, R., Caruso, J., Crews, H., Heumann, K. (Eds.), *Handbook of Elemental Speciation II: Species in the Environment, Food, Medicine and Occupational Health*. Wiley. Chichester (UK), pp. 69-85.
- RIVM. 2001. Technical Evaluation of the Intervention Values for Soil/Sediment and groundwater. RIVM Report 711701023. National Institute of Public health and ten Environment, Bilthoven, The Netherlands.
- RIVM. 2004. Guidance for deriving Dutch Environmental Risk Limits from EU-Risk Assessment Reports of existing substances. Report 601501020/2004.
- Simón, M., González, V., de Haro, S., García, I. 2015. Are soil amendments able to restore arsenic-contaminated alkaline soils? *Journal of Soils and Sediments*, 15: 117-125.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). 2001. EPA's Integrated Risk Information System (IRIS). Washington DC, EEUU.

2.7. Experiencias previas en la restauración de la Sierra Minera. Preparación del suelo y enmiendas (proyecto FiAmbRes)

AUTORES: Juan José Martínez-Sánchez, Héctor Miguel Conesa Alcaraz, María Nazaret González-Alcaraz, José Antonio Franco Leehmuis, Matías Ceacero-Moreno, José Álvarez-Rogel.
Departamento de Ingeniería Agronómica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica (ETSIA), UPCT

2.7.1. Los depósitos de lodos de flotación

Como se ha tratado en capítulos anteriores, la Sierra Minera de Cartagena-La Unión constituyó durante siglos uno de los principales focos de actividad minera en la península ibérica, y sus consecuencias son visibles todavía en forma de canteras a cielo abierto sin restaurar, vacíos de materiales inertes, escorias de fundición o depósitos de lodos de flotación (Conesa y Schulín, 2010). Los depósitos de lodos de flotación, comúnmente conocidos como balsas o depósitos de residuos mineros, están constituidos por la acumulación de residuos generados durante las actividades de concentración de mineral (generalmente mediante técnicas de flotación diferencial). Después de un proceso de sedimentación, estos residuos se almacenaban en estructuras, generalmente con forma de pirámide truncada, compuestas por capas diferenciadas de materiales superpuestos entre sí. Muchas de ellas, sobre todo las construidas en épocas antiguas en las que no existían regulaciones medioambientales, se abandonaban tras finalizar la explotación minera sin haberse acometido labor alguna de restauración. Actualmente existen un total de 89 de estos depósitos, que están distribuidos por la sierra cubriendo una superficie total de unas 200 ha. Gran parte de los mismos se encuentran abandonados, sin que se haya llevado a cabo labor alguna de restauración (García-García, 2004) y son una fuente de dispersión de los metales y metaloides que contienen.

Cuando los depósitos entrañan un riesgo inaceptable de colapso y/o estén cerca de poblaciones y/o

almacenen residuos extremadamente ácidos, se deberían priorizar actuaciones de restauración como la eliminación/reubicación o el sellado y cubrición *in situ*. Sin embargo, a veces es poco viable asumir económicamente y técnicamente estas actuaciones al conjunto de depósitos de un antiguo distrito minero, lo que obliga a buscar medidas alternativas complementarias. El fitomanejo por fitoestabilización asistida es una de estas alternativas (Robinson et al. 2009). Se basa en mejorar los suelos de los depósitos adicionando enmienda e introducir una cubierta vegetal para proteger al suelo de la erosión y fijar los metales/metaloides en la rizosfera, evitando su translocación a las partes aéreas de las plantas y/o la lixiviación hacia las aguas subterráneas. En la Sierra Minera de Cartagena-La Unión existen numerosos depósitos mineros y zonas con acumulación de residuos alejados de los núcleos de población, los cuales representan un riesgo menor para el medio ambiente y la salud de las personas. Estas zonas serían ideales para la aplicación de técnicas de fitomanejo con el objetivo de disminuir sus riesgos medioambientales sin incurrir en elevados costes y empleando soluciones basadas en la naturaleza. Hay que indicar que a veces habrá que combinar el fitomanejo con obras de cierta envergadura, como ocurre en taludes en los que haya que suavizar la pendiente para facilitar el establecimiento y desarrollo de la vegetación y/o en zonas de los depósitos con inestabilidad estructural.

2.7.2. El proyecto FiAmbRes: objetivos y metodología

¿Cuál ha sido el objetivo general del proyecto y dónde se ha realizado?

El objetivo principal del proyecto FiAmbRes (Aplicación de técnicas de Fitomanejo para la restauración

Ambiental de depósitos de Residuos mineros metalíferos en zonas semiáridas, PDC2021-121263-I00; <https://fiambres.es/>) ha sido poner en valor la aplicación de técnicas de fitomanejo para la restauración ambiental de depósitos de residuos mineros abandonados que

contienen lodos de flotación procedentes de lavaderos de mineral. Se ha desarrollado en una parcela piloto de unos 2.500m² ubicada en un depósito de lodos de flotación abandonado (**Figura 1**) situado dentro del Parque Regional de Calblanque, Monte de las Cenizas y Peña del Águila, en la Sierra Minera de Cartagena-La

Unión. El suelo de la parcela era franco-arenoso, con un pH $\approx$ 7,4, conductividad eléctrica $\approx$ 3,5 dS m⁻¹ (extracto 1:2,5) y carbonato cálcico $\approx$ 2%. Las concentraciones totales de metales/metaloideos (digestión ácida) fueron, como promedios: Zn $\approx$ 11 g kg⁻¹, Mn y Pb $\approx$ 7,5 g kg⁻¹, As $\approx$ 394 mg kg⁻¹, Cu $\approx$ 69 mg kg⁻¹ y Cd $\approx$ 38 mg kg⁻¹.

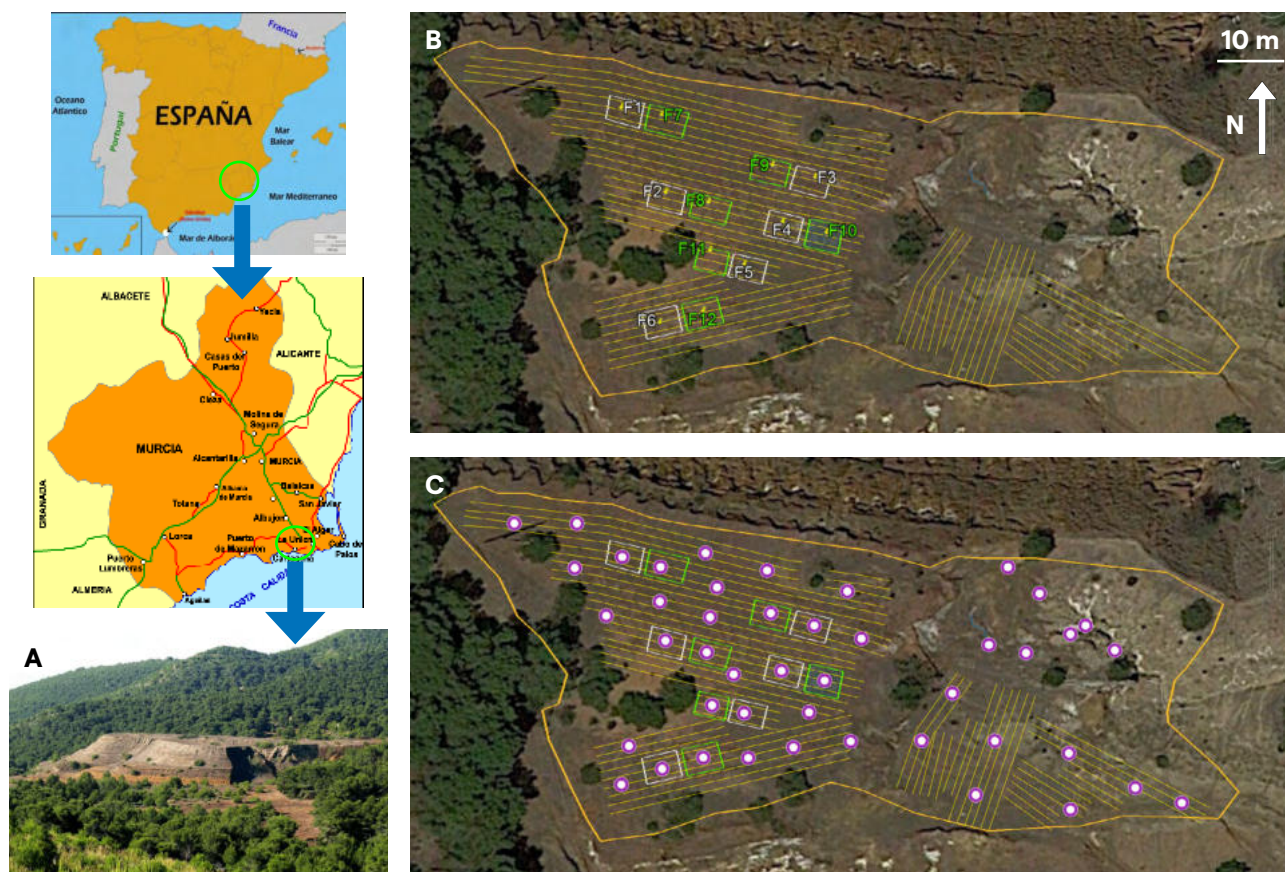


Figura 1. A) Ubicación del depósito de residuos mineros en la que se ha desarrollado el proyecto FiAmbRes. B) Vista aérea de la parcela piloto (2.500 m²) en la que se han marcado en color amarillo los límites y los surcos de plantación. Además, se ha señalado la ubicación de las 12 subparcelas de seguimiento del efecto fajina x enmienda; de la F1 a F6 corresponden a las parcelas sin adición de enmienda (ver apartado 4.2.1 para detalles). C) ubicación de las 45 fajinas forestales construidas. Fuentes: <http://www.mapade.org/espana.html>, <http://espanamapa.blogspot.com/2011/10/murcia-mapa-ciudad-de-la-region.html>, earth.google.es.

¿Qué actuaciones se llevaron a cabo?

La parcela piloto se encontraba prácticamente desprovista de vegetación (**Figura 2**), con excepción de la presencia de algunos ejemplares de *Pinus halepensis*, *Tetraclinis articulata* y *Tamarix canariensis* que habían crecido de manera espontánea a lo largo de los años. Las labores de preparación del suelo y plantación se llevaron a cabo entre noviembre de 2021 y enero de 2022. Además, en la parcela se colocaron posaderos de aves y se hizo un seguimiento de la fauna. Para más de-

talles acerca de los procedimientos seguidos, se puede consultar la publicación de Álvarez-Rogel et al. (2024).

Primero se labró el suelo hasta 20 cm de profundidad mediante un arado de golondrina abriendo surcos separados 1 metro (**Figura 3**). Se evitó voltear el suelo para reducir la posible oxidación de los sulfuros contenidos en los residuos mineros. A continuación, se aplicó una enmienda orgánica consistente en una mezcla de 850 kg de biochar de podas de árboles con 470 kg de compost de residuos sólidos urbanos (RSU) procedentes del vertedero de la ciudad de Cartagena.



Figura 2. Aspecto de la parcela piloto del proyecto en noviembre 2021, antes de comenzar las labores de preparación del suelo.



Figura 3. Izquierda: realización de surcos previa a la plantación. Derecha: incorporación de la enmienda en los surcos de plantación.

El biochar tuvo un pH más elevado ($\approx 9,7$), menos conductividad eléctrica (CE) ($\approx 1,5 \text{ dS m}^{-1}$), más carbono orgánico total (COT) ($\approx 624 \text{ mg kg}^{-1}$), menos nitrógeno total (NT) ($\approx 4 \text{ g kg}^{-1}$) y una razón COT/NT más alta (≈ 160) que el RSU (pH $\approx 6,4$; CE $\approx 7,5$; COT $\approx 319 \text{ g kg}^{-1}$; TN $\approx 17 \text{ g kg}^{-1}$; COT/NT ≈ 18). No se detectó CaCO_3 en el biochar, mientras que el RSU tuvo una concentración de $\approx 178 \text{ g kg}^{-1}$. En contenido de fósforo total (P-tot) fue algo más bajo en el biochar ($\approx 1728 \text{ mg kg}^{-1}$) que en el RSU ($\approx 3315 \text{ mg kg}^{-1}$). En cuanto al carbono orgánico soluble (COS) y el nitrógeno orgánico soluble (NOS), ambos fueron más elevados en el RSU (COS $\approx 23 \text{ g kg}^{-1}$; NOS $\approx 1,5 \text{ g kg}^{-1}$) que en el biochar (COS $\approx 0,26 \text{ g kg}^{-1}$; NOS $\approx 0,05 \text{ mg kg}^{-1}$). La enmienda resultante de la mezcla se adicionó manualmente en una proporción de 4,4 kg por metro lineal en los surcos de plantación y se enterró y mezcló dentro de los 20 cm superficiales de suelo empleando rastrillos con el fin de asegurar la homogeneidad (Figura 3).

Hay que indicar que se dejaron seis subparcelas de 4 m x 3 m sin adición de enmienda, a fin de poder emplearlas como subparcelas control para compararlas con el resto de la parcela enmendada y así evaluar

el efecto de la adición de la enmienda sobre el suelo del depósito (ver detalles más adelante). Denominaremos a las seis subparcelas sin enmienda y sus correspondientes con enmienda como subparcelas de seguimiento del efecto *fajina x enmienda*. Los datos de crecimiento de las plantas y de mejora en las condiciones del suelo que se presentan en este capítulo corresponden a dichas parcelas.

Tras la preparación del suelo se procedió a la construcción de 45 fajinas forestales (Figura 1), fabricadas con restos de poda de ramas de pinos de la zona. Las fajinas forman parte de las denominadas técnicas de bioingeniería y consisten en manojos de ramas vivas o muertas (en este caso eran restos de poda y, por tanto, ramas muertas) que se atan o amontonan en determinados sitios. Las fajinas sirven de barrera contra la erosión, de refugios para la fauna, aportan materia orgánica al suelo según se van descomponiendo, generan microambientes sombreados que facilitan la germinación de semillas, etc. (Oreja et al., 2020). Las fajinas que se construyeron tuvieron unos 4 m de largo, 0,5 m de ancho y 0,6 m de alto. De las 45 fajinas construidas, 12 se ubicaron dentro de las

12 subparcelas de seguimiento del efecto *fajina* x *enmienda* y las 33 restantes fuera de ellas. Todas las *fajinas* se orientaron siguiendo la dirección de los surcos de plantación, quedando una cara a la solana y

otra a la umbría. Posteriormente se hizo el replanteo de la plantación marcando los puntos exactos en los que se colocarían las plantas dentro de los surcos y, a continuación, se llevó a cabo la plantación (**Figura 4**).



Figura 4. Izquierda: construcción de fajinas forestales. Derecha: plantación. Estas labores se realizaron con la ayuda de la Fundación Sierra Minera.

Se utilizaron especies de plantas autóctonas en base a su idoneidad para desarrollarse en suelos con propiedades deficientes y en su capacidad de inmovilizar metales a través de sus raíces y rizosferas. Con el objetivo de fomentar la diversidad y el desarrollo del ecosistema se utilizaron árboles, arbustos y hierbas. En total se plantaron 742 ejemplares de las siguientes especies: *Pinus halepensis*, *Tetraclinis articulata*, *Tamarix canariensis*, *Atriplex halimus*, *Maytenus senegalensis*, *Rhamnus lycioides*, *Dorycnium pentaphyllum* y *Stipa tenacissima*. Todas las plantas contaron con un protector forestal de cartón de 30 cm de alto y se realizó un alcorque para facilitar la retención del agua de lluvia y del riego de implantación (aporte de 10 L de agua a cada planta a finales de diciembre de 2021).

Las **Figuras 5 y 6** muestran el diseño de la plantación en las 12 parcelas de seguimiento del efecto *fajina* x *enmienda*. Las *fajinas* se ubicaron justo entre dos surcos de plantación y de forma paralela a los mismos. Las especies *Pinus halepensis*, *Tetraclinis articulata* y *Atriplex halimus* se plantaron de forma que se pudiera evaluar los factores orientación, *fajina* y *enmienda*, ya que se colocaron a ambos lados de las *fajinas*, con tres ejemplares de cada especie en la orientación solana y tres en la orientación umbría. Las especies *Dorycnium pentaphyllum*, *Rhamnus lycioides* y *Maytenus senegalensis* se plantaron de manera que se pudiera evaluar el factor *enmienda*, pero no el factor *fajina*, ya que se ubicaron en el surco exterior al que discurría la zona de umbría de las *fajinas*. En estas parcelas la distancia entre plantas fue de 50 cm.

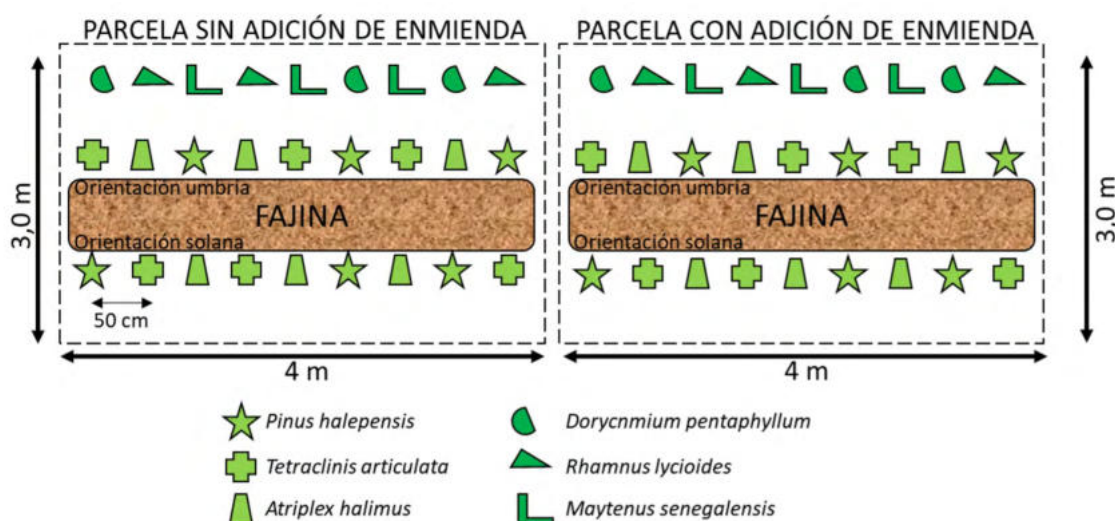


Figura 5. Izquierda: construcción de fajinas forestales. Derecha: plantación. Estas labores se realizaron con la ayuda de la Fundación Sierra Minera.

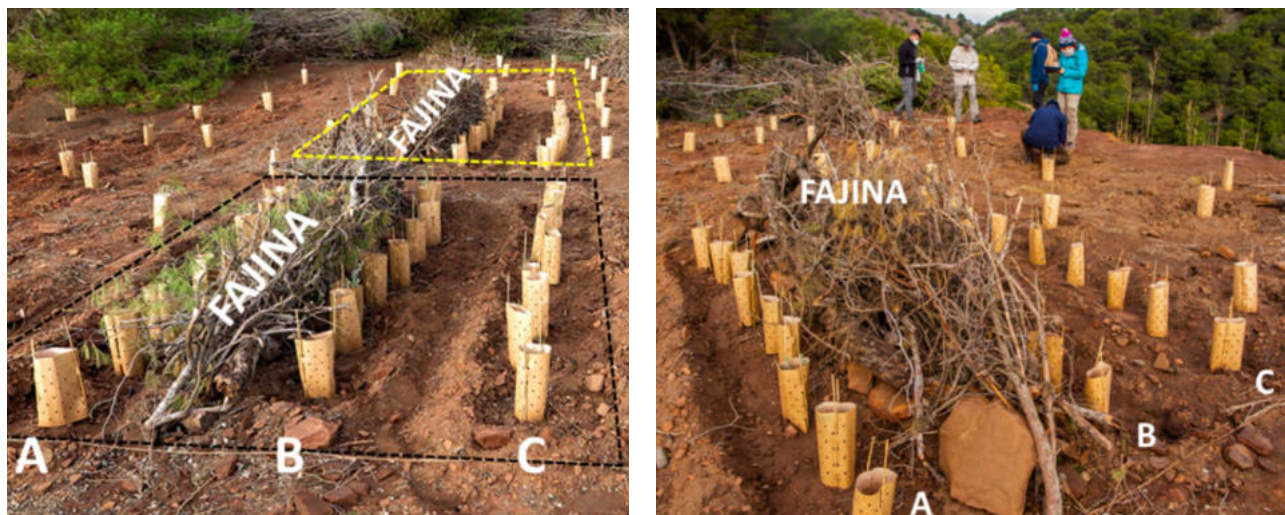


Figura 6. Imágenes en las que se pueden ver *parcelas de seguimiento del efecto fajina x enmienda*. En la imagen de la izquierda se ven dos parcelas, una con adición de enmienda (en primer término, delimitada con línea discontinua negra) y otra sin ella (al fondo, delimitada con línea discontinua amarilla). En la imagen de la derecha se ve una de estas parcelas. En ambas imágenes, se han indicado con letras las tres filas de plantación. Fila A: *P. halepensis*, *T. articulata* y *A. halimus* en orientación solana; fila B: *P. halepensis*, *T. articulata* y *A. halimus* en orientación umbría; fila C: *D. pentaphyllum*, *M. senegalensis* y *R. lycioides*.

Monitorización de la parcela piloto

Se tomaron medidas de altura de todas las plantas en febrero y junio de años 2022 y 2023. En febrero de 2023 se retiraron todos los protectores forestales y en mayo de 2023 se arrancaron seis individuos de cada especie para evaluar la biomasa de raíces, tallos y hojas, así como de analizar los contenidos de metales acumulados. Además, se llevó un registro de la vegetación espontánea que apareció en la parcela piloto, haciendo regularmente listados de especies y conteo de individuos. El seguimiento del suelo se hizo a dos niveles: toma de datos directamente en el campo y recogida y análisis de muestras de suelo para su caracterización posterior en laboratorio. Para más detalles se puede consultar la publicación de Álvarez-Rogel et al. (2024).



Figura 7. Termómetro para medir la temperatura del suelo y cebos insertados para evaluar la actividad alimentaria de los invertebrados edáficos.

2.7.3. El proyecto FiAmbRes: resultados

Efectos de los tratamientos sobre las propiedades físicas del suelo

El laboreo aumentó la capacidad de retención de agua del suelo y disminuyó su densidad aparente;

ambos efectos se vieron aumentados al combinar laboreo y enmienda (**Figura 8**).

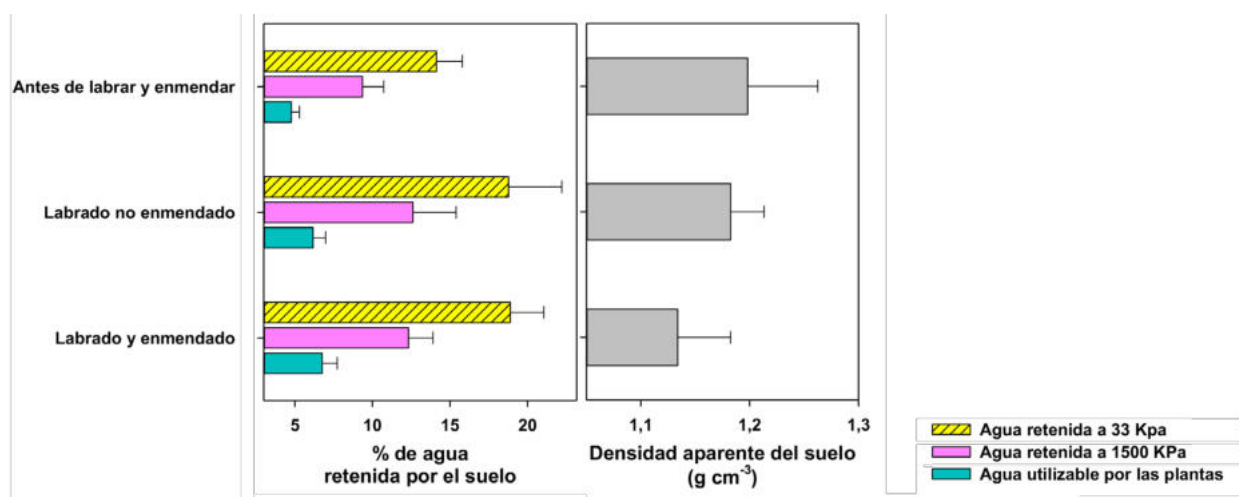


Figura 8. Izquierda: porcentaje de agua retenida en el suelo a capacidad de campo (33 kPa) y a punto de marchitez (1500 kPa), y porcentaje de agua teóricamente utilizable por las plantas (membrana de Richards). Derecha: densidad aparente del suelo. N=6. Media $\pm$ error estándar.

Efectos de los tratamientos sobre la actividad alimentaria de los invertebrados del suelo

La actividad alimentaria de los invertebrados del suelo se vio estimulada por la enmienda desde el principio (Figura 9) y a partir de julio había aumentado incluso en los tratamientos sin enmienda. Esto indica que conforme la vegetación fue desarrollándose tanto la presencia de plantas como la enmienda contribuyeron a aumentar la actividad alimentaria. El laboreo pudo facilitar este proceso, especialmente al principio, debido al evidente des-

censo de la densidad aparente (Figura 8) y, posteriormente, gracias a los canales y huecos abiertos por las raíces que, como se mostrará después, crecieron de manera muy notable en algunos casos. Los resultados también indican que la actividad alimentaria presentó un patrón de variabilidad estacional, un aspecto que ya se había observado en depósitos de la zona colonizados espontáneamente por vegetación (Álvarez-Rogel et al., 2022).

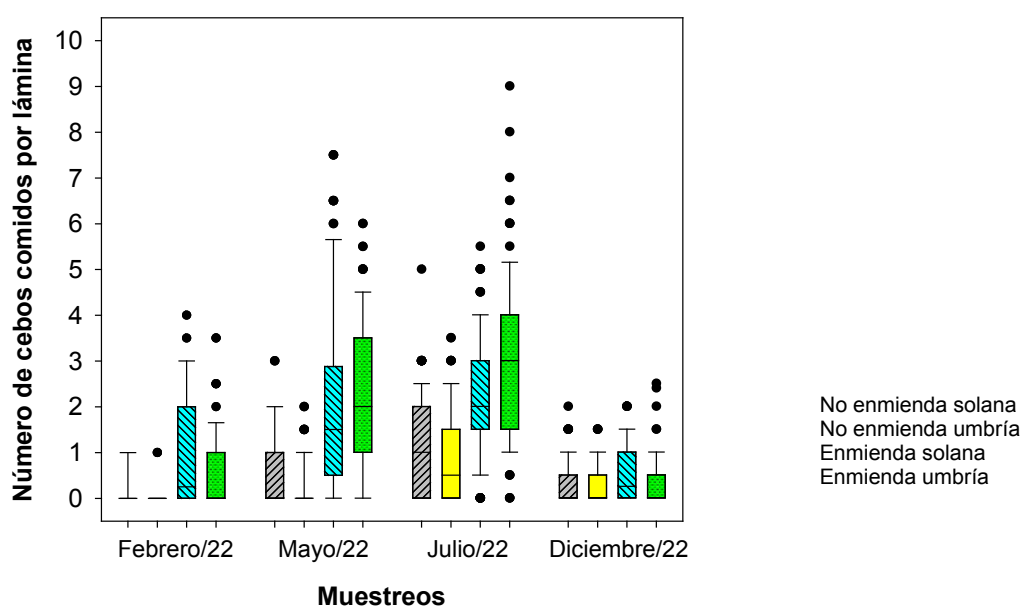


Figura 9. Evolución de la actividad alimentaria de los invertebrados del suelo entre febrero y diciembre de 2022 en función de la orientación con respecto a las fajas y a la adición de la enmienda. Las líneas horizontales dentro de las cajas indican la mediana, los bigotes los percentiles 5 y 95 y los círculos negros los valores fuera de dichos percentiles. N = 60.

Efectos de los tratamientos sobre el pH y la salinidad (conductividad eléctrica, CE) del suelo

La enmienda provocó un aumento del pH del suelo a corto plazo (**Figura 10**), que se puede atribuir al pH alcalino del biochar. Este efecto se fue disipando con el tiempo y a los diez meses (en diciembre 2022) los valores se habían estabilizado $\approx 7,5$ e igualado con los tratamientos sin enmienda. En cuanto a la CE, al inicio (febrero 2022) los suelos mostraron una salinidad relativamente alta que no se vio afectada con la adición de la enmienda. Sin embargo, a los diez meses (diciembre 2022) la salinidad había

disminuido tanto en los suelos con enmienda como en aquellos sin ella. Esto se puede atribuir al lavado de sales en los centímetros superficiales a causa del aumento de porosidad generado por el laboreo (**Figura 8**) y al crecimiento de las plantas (como se verá más adelante), que, por un lado, pudieron absorber cierta cantidad de sales y, por otro, favorecer el lavado de sales al crear canales gracias al crecimiento de sus raíces. La orientación a un lado u otro de las fajas no influyó ni en el pH ni en la CE.

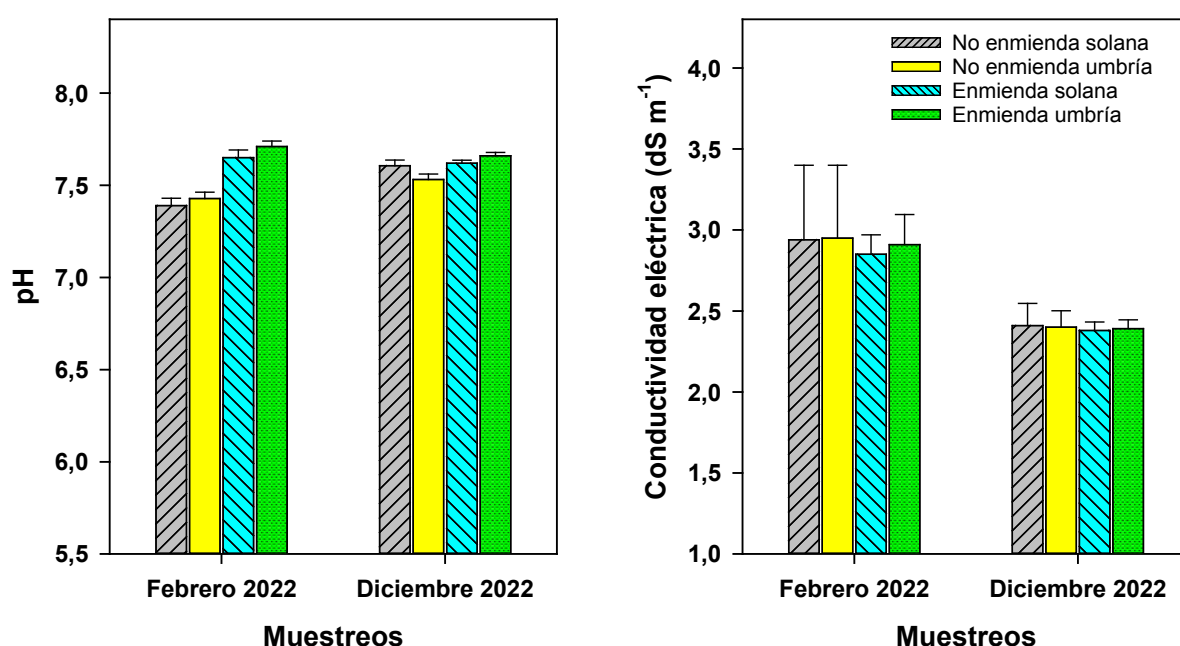


Figura 10. Izquierda: efecto de la orientación a un lado u otro de las fajas y de la adición de la enmienda sobre el pH del suelo. Derecha: efecto de la orientación a un lado u otro de las fajas y de la adición de la enmienda sobre la conductividad eléctrica del suelo. Los valores son la media de 6 repeticiones $\pm$ error estándar.

Efectos de los tratamientos sobre los contenidos de carbono orgánico total (COT), nitrógeno total (NT) y las actividades enzimáticas del suelo

La adición de la enmienda provocó un aumento de los contenidos en COT y NT en febrero 2022 (**Figura 11**). Este aumento se mantenía doce meses después, en diciembre 2022. En cuanto a los tratamientos sin enmienda, tanto los niveles de COT como de NT aumentaron entre febrero y diciembre de 2022, lo cual puede atribuirse a los restos orgánicos aportados por la vegetación que crecía en la zona, tanto la que se plantó como la que apa-

reció de forma espontánea a lo largo del tiempo (ver apartado XX.3.12).

La adición de la enmienda incrementó las actividades enzimáticas deshidrogenasa y β -glucosidasa del suelo (**Figura 12**). En diciembre de 2022 la actividad deshidrogenasa en los tratamientos con enmienda había descendido considerablemente, mientras que la actividad β -glucosidasa se mantenía a niveles simi-

lares a los de febrero. Es importante destacar que en los tratamientos sin enmienda ambas actividades enzimáticas habían aumentado en diciembre de 2022

con respecto a febrero, lo cual se puede atribuir al incremento del potencial microbiológico del suelo generado por el crecimiento de la vegetación.

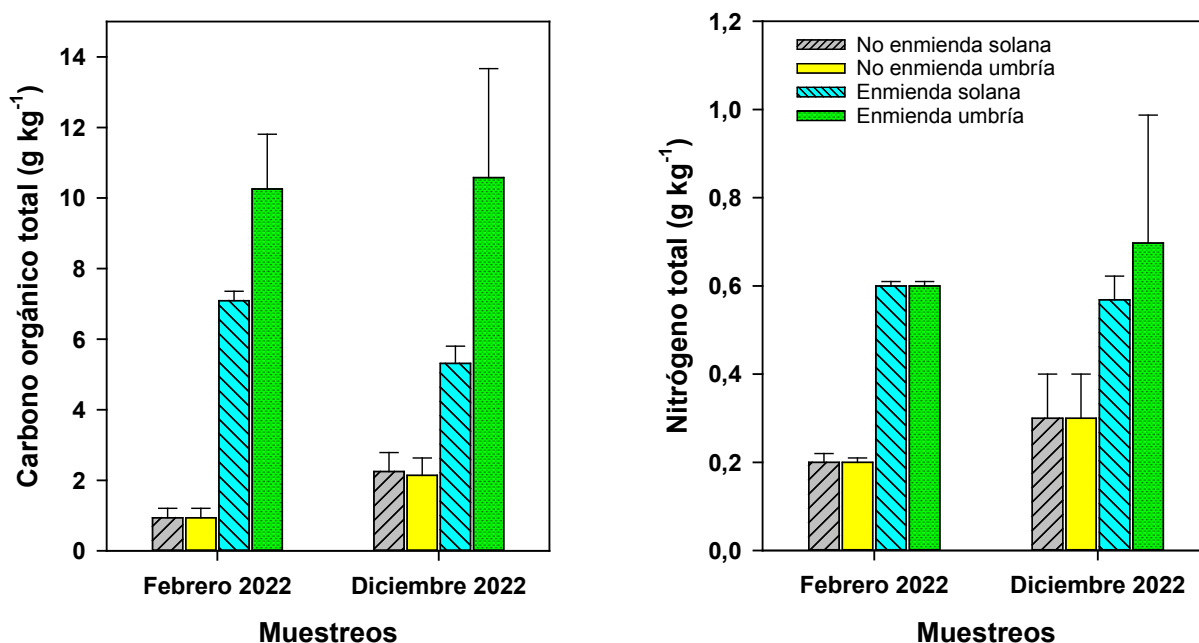


Figura 11. Izquierda: efecto de la orientación a un lado u otro de las fajinas y de la adición de la enmienda sobre el contenido de carbono orgánico total del suelo. Derecha: efecto de la orientación a un lado u otro de las fajinas y de la adición de la enmienda sobre el contenido en nitrógeno total del suelo. Los valores son la media de 6 repeticiones ± error estándar.

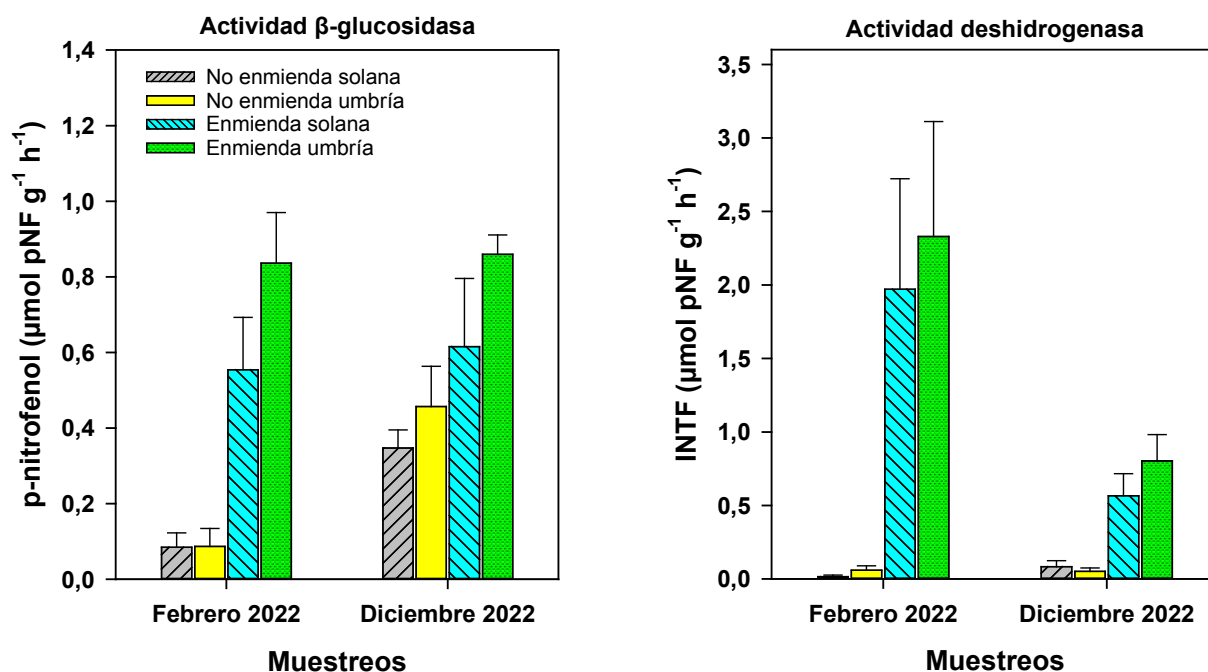


Figura 12. Izquierda: efecto de la orientación a un lado u otro de las fajinas y de la adición de la enmienda sobre la actividad deshidrogenasa del suelo. Derecha: efecto de la orientación a un lado u otro de las fajinas y de la adición de la enmienda sobre la actividad β-glucosidasa del suelo. Los valores son la media de 6 repeticiones ± error estándar.

Efectos de los tratamientos sobre las concentraciones de Cu, Mn, Zn, Cd, Pb y As extraíbles con agua

La **Figura 13** muestra las concentraciones de Mn, Zn, Cd, Pb y As extraídas con agua. La adición de la enmienda provocó una disminución de la concentración de Zn y Cd desde el principio (febrero 2022) y este efecto se mantuvo después de diez meses (diciembre 2022). Además, tanto para el Zn como para el Cd, las concentraciones disminuyeron a lo largo del tiempo, incluso en los tratamientos sin enmienda. Con respecto al Mn, Pb y As, sus concentraciones aumentaron en febrero de 2022, dos meses después de la adición de la enmienda, pero

disminuyeron después de diez meses (diciembre 2022). Se puede considerar que tanto la enmienda como el crecimiento de las plantas favorecieron una disminución de las concentraciones de metales y As solubles en agua. El efecto favorable que tiene la presencia de vegetación para disminuir las concentraciones de metales solubles del suelo en depósitos de residuos mineros se atribuye a la absorción de parte de dichos metales por las plantas y a la contribución de éstas a mejorar las condiciones del suelo (p.e., Álvarez-Rogel et al., 2021).

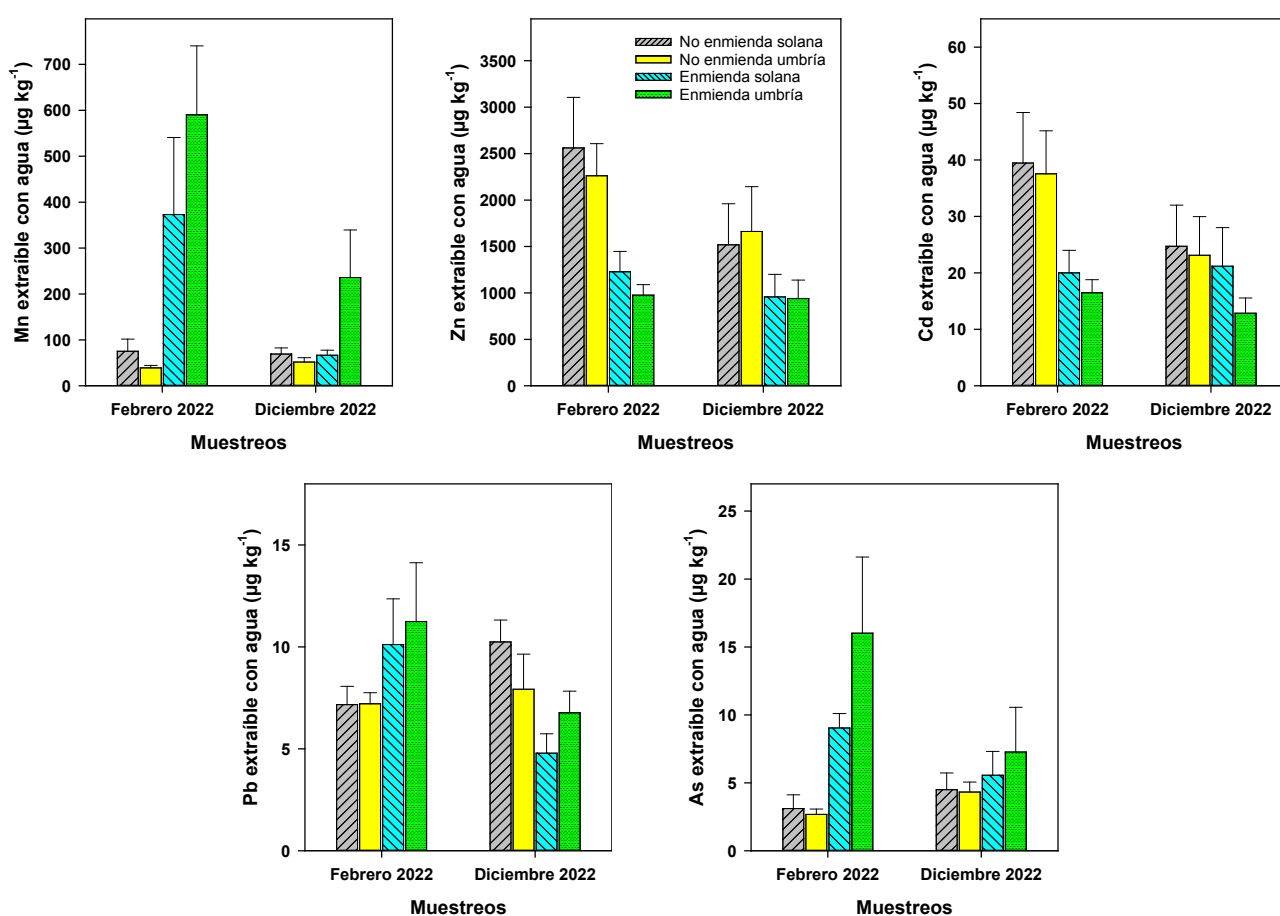


Figura 13. Efecto de la orientación a un lado u otro de las fajinas y de la adición de la enmienda sobre las concentraciones de Mn, Zn, Cd, Pb y As del suelo extraíbles con agua. Los valores son la media de 6 repeticiones $\pm$ error estándar.

Al expresar las concentraciones de metales extraíbles con agua en mg kg^{-1} y compararlas con las concentraciones totales del suelo se observa que las primeras representan una cantidad ínfima en comparación las segundas, lo cual se atribuye al pH básico del suelo que propicia una baja solubilidad de los metales. Así, el promedio de concentración de Mn soluble en agua para los cuatro tratamientos (no enmienda solana, no enmienda umbría, en-

mienda solana, enmienda umbría) fue de $0,19 \text{ mg kg}^{-1}$, mientras que el de Mn total fue de 7500 mg kg^{-1} ; el promedio de Zn soluble fue $1,51 \text{ mg kg}^{-1}$, mientras que el total fue de 11500 mg kg^{-1} ; el promedio de Cd soluble fue de $0,02 \text{ mg kg}^{-1}$ mientras el total fue de 38 mg kg^{-1} ; el promedio de Pb soluble fue de $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$ mientras el total fue de $7,4 \text{ g kg}^{-1}$; y el promedio de As soluble fue de $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$ y el total alcanzaba los 394 mg kg^{-1} .

Efectos de los tratamientos sobre la ecotoxicidad del suelo

En base a los bioensayos en los que se avaluó la supervivencia y reproducción de *Enchytraeus crypticus*, se puede afirmar que los suelos del depósito minero presentan baja ecotoxicidad. En cuanto a la supervivencia, los porcentajes fueron superiores al 60% en todos los tratamientos (Figura 13). Con respecto a la capacidad de reproducción y viabilidad de la siguiente generación, el número de juveniles obtenido en los bioensayos indica una tasa elevada, especial-

mente en los tratamientos con enmienda (Figura 14). Para este indicador, parece que la ausencia de enmienda en la orientación solana fue desfavorable, aunque este aspecto necesita ser estudiado con mayor profundidad, ya que los parámetros edáficos que podrían afectar la capacidad reproductiva de los enquitreidos (p.e., CE, pH, concentración de metales) no presentan, *a priori*, peores valores en el tratamiento sin enmienda en orientación solana.

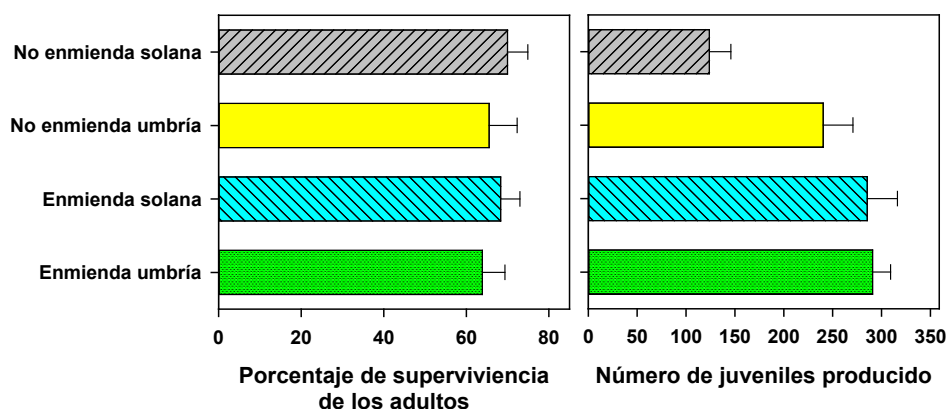


Figura 14. Efecto de la orientación a un lado u otro de las fajas y de la adición de la enmienda sobre la ecotoxicidad del suelo. Los valores son la media de 18 repeticiones $\pm$ error estándar.

Efectos de los tratamientos sobre la supervivencia y crecimiento de *Pinus halepensis*, *Tetraclinis articulata* y *Atriplex halimus*

En junio de 2023, *P. halepensis* había experimentado una mortalidad del 0%, *T. articulata* del 2% tanto con enmienda como sin ella y *A. halimus* una mortalidad del 5 % en los tratamientos sin enmienda y del 0% en los tratamientos con enmienda. Aunque los tratamientos tuvieron poca influencia en las tasas de supervivencia, sí fueron determinantes para el crecimiento de las tres especies.

Las plantas de *P. halepensis* en los tratamientos con enmienda prácticamente duplicaron su altura entre febrero y junio de 2022, para luego crecer más lentamente hasta febrero de 2023, cuando volvieron a mostrar un pico de crecimiento (Figura 15). *T. articulata*, sin embargo, se desarrolló más lentamente y en junio de 2022 sólo había crecido entre 2 y 5 cm sobre su tamaño inicial, aumentando su altura posteriormente hasta febrero 2023, cuando todos los tratamientos alcanzaron un máximo que se mantuvo más o menos sin variación hasta junio de ese año (Figura 14). Para los tratamientos sin enmienda, fue *T. articulata* el que mostró cierto efecto a la orientación, ya que las plantas que crecieron en la solana de las fajas alcanzaron mayores tamaños que las que crecieron en la umbría.

Los protectores forestales podrían haber influido en el desarrollo de *T. articulata* más que en *P. halepensis*, ya que la primera especie tardó nueve meses (hasta octubre 2022) en sobrepasarlos y ensanchar su copa.

Las plantas de *A. halimus* en los tratamientos con enmienda llegaron a alcanzar más del doble de su tamaño entre febrero y junio de 2022, aunque también crecieron bien las plantas sin enmienda. El desarrollo continuó, aunque con un crecimiento algo menos acentuado, hasta octubre y entre dicho mes y febrero 2023 se produjo una aparente disminución de tamaño, para volver a remontar después hasta junio de 2023 (Figura 14). Este fenómeno se debió a que tras el verano de 2022 se produjo una importante defoliación y el extremo superior de muchos tallos de *A. halimus* se secaron y curvaron debido al agostamiento, para rebrotar después durante la primavera de 2023. Esta defoliación tiene dos efectos importantes y contrarios en cuanto a la idoneidad de la especie para el fitomanejo. Por un lado, supone un aporte de materia orgánica al suelo, lo que contribuye a la activación de los ciclos biogeoquímicos de ciclado de carbono y nutrientes, aunque también implica un retorno de metales al sistema.

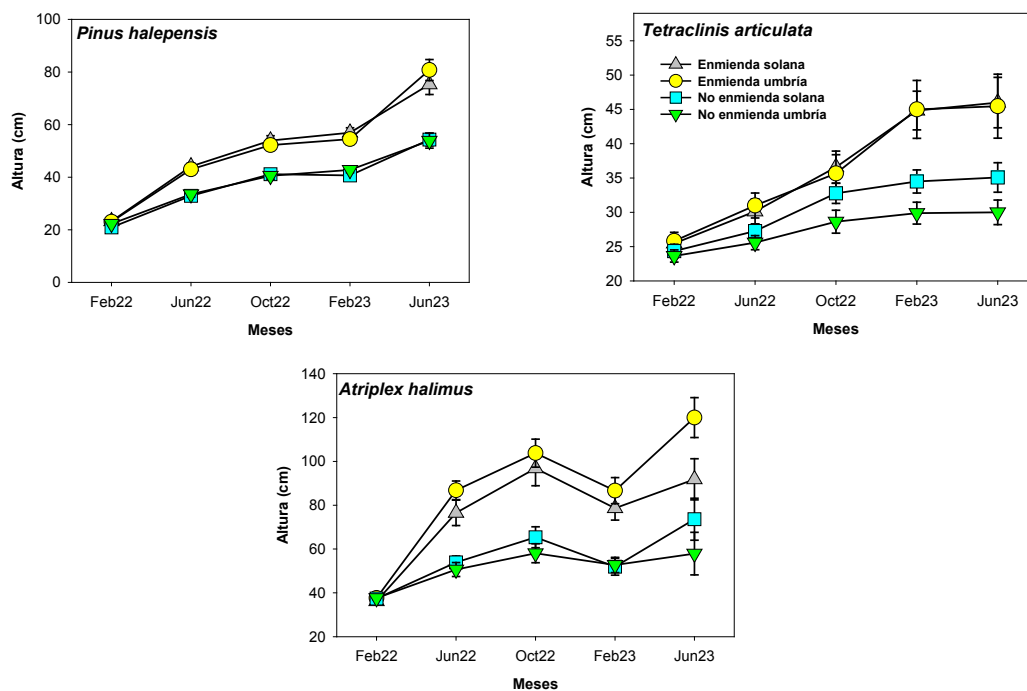


Figura 15. Efecto de la orientación a un lado u otro de las fajinas y de la adición de la enmienda sobre el crecimiento en altura de *P. halepensis*, *T. articulata* y *A. halimus*. Los valores son la media de 12 repeticiones $\pm$ error estándar.

Efectos de los tratamientos sobre la supervivencia y crecimiento de *Maytenus senegalensis*, *Dorycnium pentaphyllum* y *Rhamnus lycioides*

Estas tres especies tuvieron unas tasas de mortalidad superiores y un crecimiento menor que *P. halepensis*, *T. articulata* y *A. halimus*. Las tres especies se vieron muy favorecidas por la enmienda (Figura 16). En junio de

2023 la mortalidad de *M. senegalensis* era del 17% sin enmienda y del 11% con enmienda, la de *D. pentaphyllum* del 50% sin enmienda y el 33% con enmienda y la de *R. lycioides* del 0% sin enmienda y del 11% con ella.

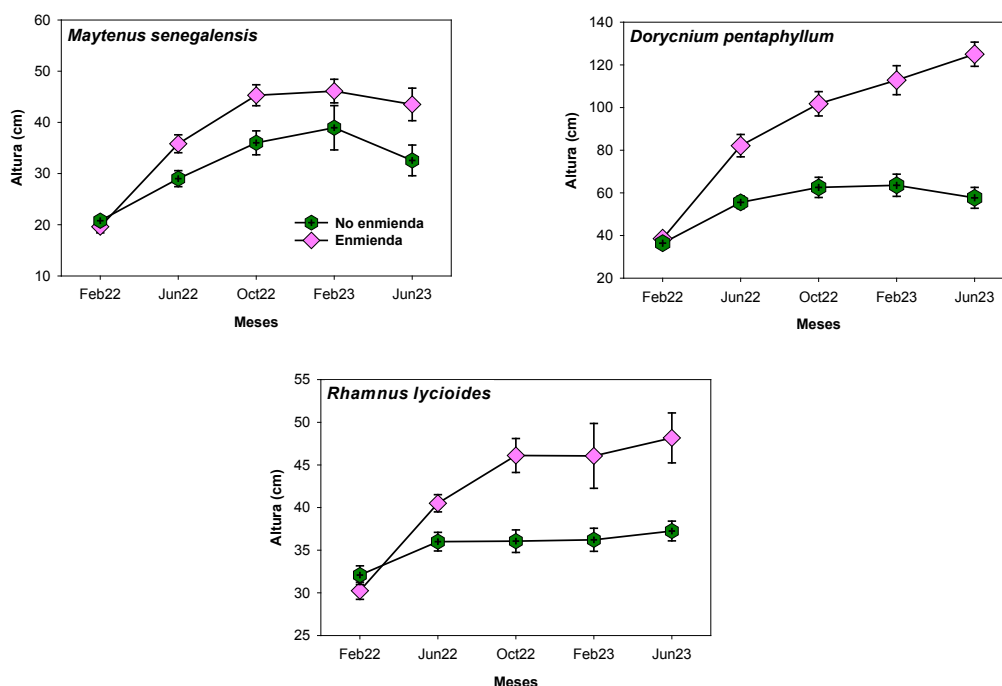


Figura 16. Efecto de la adición de la enmienda sobre el crecimiento en altura de *M. senegalensis*, *D. pentaphyllum* y *R. lycioides*. Los valores son la media de 12 repeticiones $\pm$ error estándar.

Efectos de los tratamientos sobre la biomasa de las especies plantadas

Para todas las especies plantadas se observó una mayor biomasa en los tratamientos con enmienda (**Figura 17**). *A. halimus* y *D. pentaphyllum* fueron las

especies que más biomasa generaron, destacando la abundante floración de la segunda, que produjo gran cantidad de semillas.

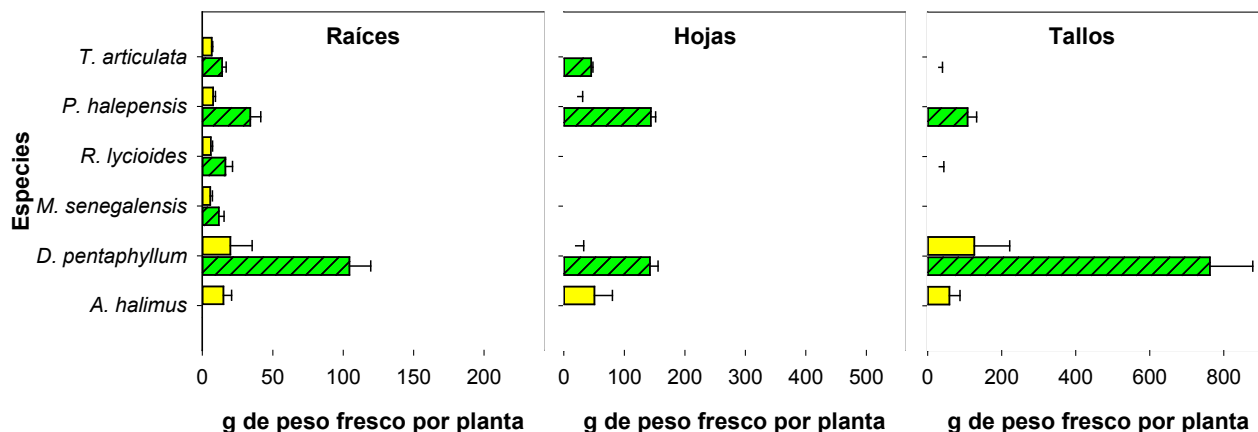


Figura 17. Efecto de la adición de la enmienda sobre la biomasa de raíces, tallos y hojas de las seis especies plantadas (peso fresco). Los valores son la media de 12 repeticiones $\pm$ error estándar.

Es importante destacar que la mayoría de las raíces principales había crecido siguiendo los surcos de plantación y algunas alcanzaron longitudes de más de un metro, mostrando una ramificación extensa

en raíces primarias y secundarias (**Figura 18**). Esto subraya la importancia del laboreo para el éxito de la plantación, igual que ocurría con la mejora de las propiedades físicas del suelo.



Figura 18. Izquierda: planta de *D. pentaphyllum* recién arrancada en la que se puede apreciar la elevada biomasa aérea y la gran longitud y numerosas ramificaciones de las raíces. Derecha: se aprecia el crecimiento de una raíz principal de *A. halimus* siguiendo el surco de plantación y las numerosas raíces primarias y secundarias.

Efectos de los tratamientos sobre la acumulación de Cu, As, Cd, Pb y Zn en las plantas

Las concentraciones de metales y As en las hojas y raíces de las plantas se muestran en las **Figuras 19 y 20** respectivamente.

Por lo general, en raíces las concentraciones fueron mayores que en hojas (cumpliéndose uno de

los objetivos del fitomanejo) con la excepción de *A. halimus*, que presentó concentraciones similares o incluso más elevadas en las hojas. La enmienda no tuvo un efecto evidente sobre la acumulación en hojas, pero en las raíces favoreció una menor concentración en todas las especies.

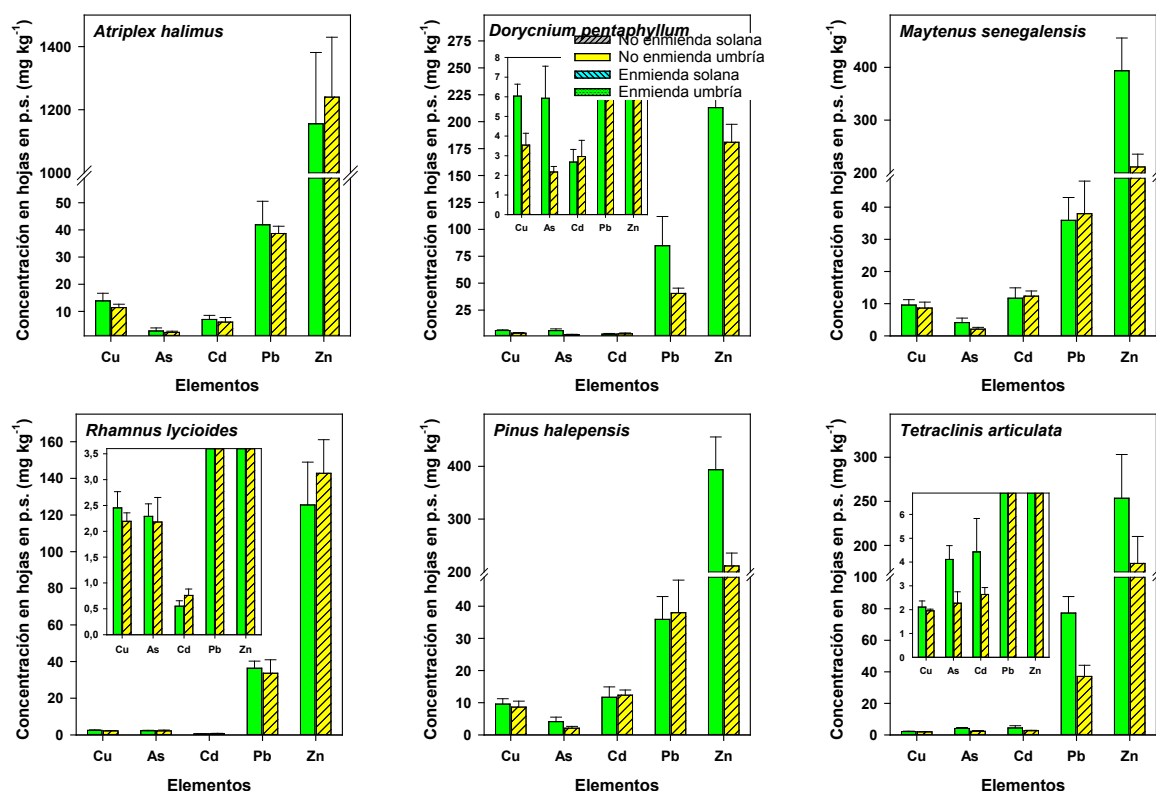


Figura 19. Efecto de la adición de la enmienda sobre la acumulación de metales en las hojas de las seis especies estudiada expresadas en peso seco (p.s.). Los valores son la media de 12 repeticiones $\pm$ error estándar. Los gráficos pequeños muestran en detalle las concentraciones más bajas.

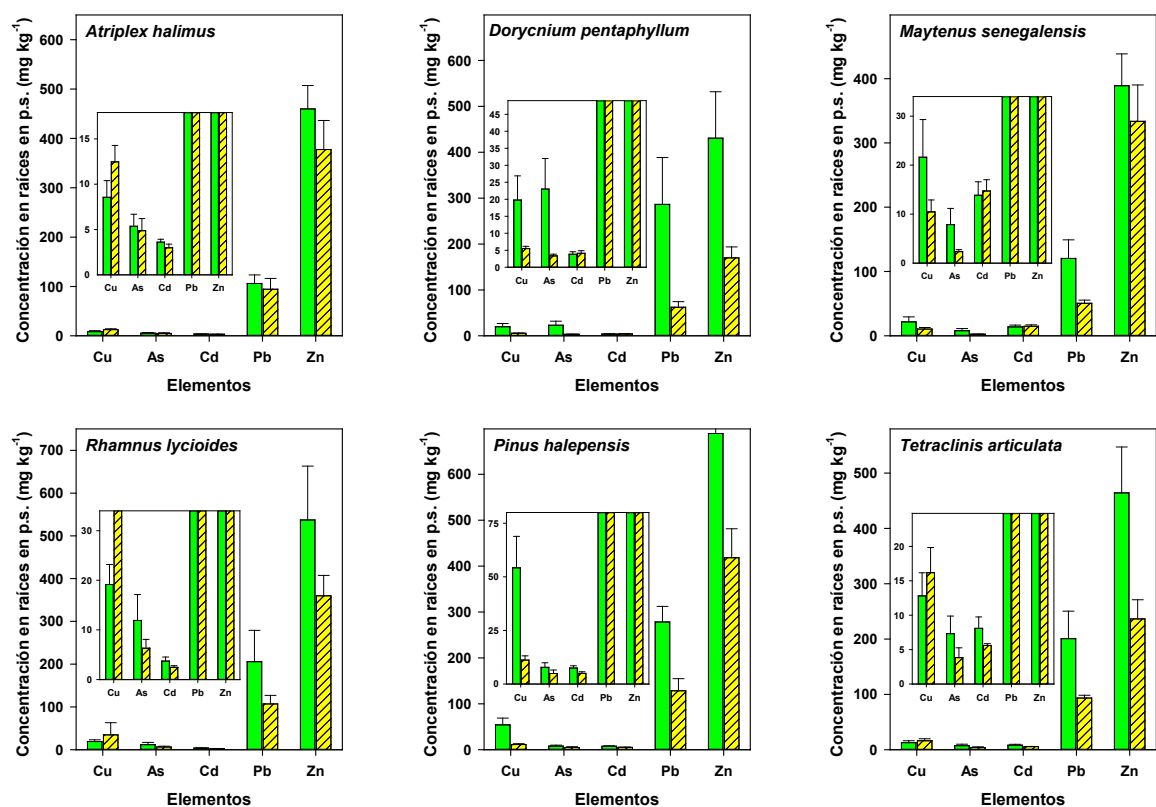


Figura 20. Efecto de la adición de la enmienda sobre la acumulación de metales en las raíces de las seis especies estudiadas expresadas en peso seco (p.s.). Los valores son la media de 12 repeticiones $\pm$ error estándar. Los gráficos pequeños muestran en detalle las concentraciones más bajas.

Hay diversos factores que pueden influir en la mayor o menor acumulación de elementos en las plantas. Por ejemplo, las plantas jóvenes que están creciendo activamente suelen acumular, y translocar a la parte aérea, en mayor medida que las plantas adultas. Una vez que las plantas son adultas, se produce un efecto de dilución de las concentraciones, ya que la incorporación de elementos no es proporcional al aumento de biomasa. Estas pueden ser algunas de las causas responsables de que las concentraciones de varios elementos en las plantas que han crecido en la parcela piloto del proyecto sean algo más elevadas que las encontradas en diversos trabajos científicos que analizaron plantas adultas de la zona (Párraga-Aguado et al., 2014a y b).

Colonización de la vegetación espontánea en la parcela piloto

En abril de 2023 se inventariaron en la parcela piloto 1633 plantas de 40 especies distintas pertenecientes a 17 familias botánicas diferentes, destacando tres de estas familias por su riqueza específica: las compuestas, con 8 especies diferentes y 184 individuos (de los cuales 58 pertenecen a *Dittrichia viscosa*); las gramíneas, con seis especies y 209 individuos (de los que 170 son de *Piptatherum miliaceum*); y las leguminosas, con otras seis especies y 98 individuos (de los que 71 son de *Dorycnium pentaphyllum*). El resto de las familias presentan una o dos especies, aunque algunas de ellas con gran número de individuos, como *Pinus halepensis* (199 individuos), *Limonium cossonianum* (73), *Salsola kali* (598) y *Zygophyllum. fabago* (205). El carácter de las especies que han germinado en la

parcela restaurada es eminentemente primocolonizador, y excepto *Salsola kali* (especie anual), las especies predominantes son vivaces o perennes. Aunque era de esperar la colonización por parte de especies ruderales o arvenses como *Piptatherum miliaceum*, *Zygophyllum fabago* o *Dittrichia viscosa* (muy frecuentes en hábitats alterados de la zona de estudio), destaca el importante papel colonizador que está jugando el pino carrasco (*Pinus halepensis*), favorecido por el hecho de haberse construido las fajinas con ramas de ejemplares adultos de esta especie que contenían abundantes piñas. La dispersión del piñón que se ha producido justamente en el terreno protegido por las fajinas (fenómeno observado en otros trabajos; Oreja et al., 2020) ha provocado la emergencia de casi 200 plántulas de este pino en tan reducido espacio (Figura 20). De igual manera destaca la presencia de varias especies de matorral típico del sotobosque de los pinares de la sierra de Cartagena, testimonial de momento para especies como *Rhamnus lycioides*, *Chamaerops humilis* o *Genista valentina* subsp. *jimenezii*, pero muy abundante en el caso de *Dorycnium pentaphyllum*, que está mostrando un carácter primocolonizador muy marcado. Su germinación ha sido muy abundante tanto entre las filas de la plantación como en los restos de alcorques de otras especies, pero especialmente al amparo de las fajinas (Figura 21). Sin duda alguna la procedencia de las semillas es de los ejemplares introducidos en la plantación, que fueron capaces de florecer ya en la primera primavera tras la plantación. Si bien ha sido una de las especies introducidas que mayor mortalidad ha tenido, ha quedado compensada con el reclutamiento de numerosas plantas nacidas de sus propias semillas (Figura 22).



Figura 21. Izquierda: plántula de *P. halepensis* originada por la germinación de piñones contenidos en las piñas que portaba una de las ramas usada para construir las fajinas. Derecha: plántulas de *P. halepensis* aparecidas al amparo de las fajinas.

Además de los aspectos mencionados, hay que indicar que junto varios de los ejemplares introducidos en la plantación aparecieron espontá-

neamente nuevas plantas de otras especies, probablemente debido a fenómenos de facilitación (Figura 22).



Figura 22. Izquierda: Ejemplar de *D. pentahyllum* repleto de frutos en octubre de 2023. Derecha: nuevas plantas de *D. pentahyllum* aparecidas a partir de la germinación de las semillas producidas por los ejemplares plantados (se puede apreciar creciendo junto a un ejemplar de *L. Spartum* introducido con la plantación en lo que podría ser un fenómeno de facilitación).

Conclusiones

Los tratamientos aplicados (laboreo y adición de enmienda) llevaron a una mejora en las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, lo que, a la postre, mejoró la capacidad funcional de éste, un aspecto clave para activar los ciclos biogeoquímicos, como el ciclado de materia orgánica y nutrientes, y atenuar los riesgos asociados a la presencia de metales y As en los residuos mineros. Las bajas tasas de mortalidad de las plantas introducidas y el elevado crecimiento de todas las especies, sobre todo en los tratamientos con enmienda e independientemente de la orientación con respecto a las fajinas, demuestran que las especies elegidas y las técnicas empleadas son adecuadas para conseguir un desarrollo consistente de la cubierta vegetal en depósitos de residuos mineros abandonados de la zona en un periodo corto de tiempo. Además, los tratamientos desbloquearon la colonización espontánea de la parcela por parte de la vegetación nativa, proceso que estuvo facilitado por la presencia de las fajinas. Los efectos positivos sobre el desarrollo de la vegetación se mantenían en primavera de 2024, más de dos años después de haber realizado la plantación (Figura 22).

El éxito de las técnicas de manejo empleadas nos lleva a concluir que la rehabilitación de los depósitos mineros es factible a medio plazo. Incluso a largo plazo, la restauración ecológica completa del ecosistema circundante es posible, siempre y cuando se completen

las fases de seguimiento de las actuaciones en el futuro y se apliquen las acciones posteriores que demande la gestión adaptativa de este tipo de restauraciones.



Figura 22. Izquierda: Ejemplar de *D. pentahyllum* repleto de frutos en octubre de 2023. Derecha: nuevas plantas de *D. pentahyllum* aparecidas a partir de la germinación de las semillas producidas por los ejemplares plantados (se puede apreciar creciendo junto a un ejemplar de *L. Spartum* introducido con la plantación en lo que podría ser un fenómeno de facilitación).

Agradecimientos

El proyecto FiAmbRes (PDC2021-121383-I00) fue financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MCIN/AEI/10.13039/501100011033) y por la Unión Europea Next GenerationEU/PRTR. M. Nazaret González-Alcaraz es investigadora del programa Ra-

món y Cajal del Ministerio de Ciencia e Innovación de España (RYC2020-029322-I). M. Ceacero-Moreno tiene un contrato predoctoral cofinanciado con fondos del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y la Universidad Politécnica de Cartagena.

Bibliografía

- Álvarez-Rogel, J., Peñalver-Alcalá, A., González-Alcaraz, M.N. 2022. Spontaneous vegetation colonizing abandoned metal(loid) mine tailings consistently modulates climatic, chemical and biological soil conditions throughout seasons. *Science of the Total Environment*, 838: 155945. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155945>.
- Álvarez-Rogel, J., Peñalver-Alcalá, A., Jiménez-Cárceles, F.J., Carmen Tercero, M., González-Alcaraz, M.N. 2021. Evidence supporting the value of spontaneous vegetation for phytomanagement of soil ecosystem functions in abandoned metal(loid) mine tailings. *Catena*, 201: 105191. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105191>.
- Álvarez-Rogel, J., Martínez-Sánchez, J.J., Conesa, H.M., Leehmuis, J.A., Ceacero-Moreno, M., González-Alcaraz, M.N. 2024. Guía de aplicación de técnicas de fitomanejo para la restauración ambiental de depósitos de residuos mineros metalíferos en zonas semiáridas. Cartagena: ediciones UPCT, 2024. 139 p. ISBN: 978-84-17853-79-2. <http://hdl.handle.net/10317/13767>.
- Conesa, H.M., Párraga-Aguado, I. 2021. Effects of a soil organic amendment on metal allocation of trees for the phytomanagement of mining-impacted soils. *Environmental Geochemistry and Health*, 43: 1355-1366. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00479-0>.
- Conesa, H.M., Párraga-Aguado, I., Jiménez-Cárceles, F.J., Risueño, Y. 2023. Evaluation of the rhizospheric microbiome of the native colonizer *Piptatherum miliaceum* in semiarid mine tailings. *Environmental Geochemistry and Health*, 45: 9359-9371. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01357-y>.
- Conesa, H.M., Schulin, R. 2010. The Cartagena-La Unión mining district (SE Spain): a review of environmental problems and emerging phytoremediation solutions after fifteen years research. *Journal of Environmental Monitoring*, 12: 1225-1233. <https://doi.org/10.1039/C000346H>.
- García-García, C., 2004. Impacto y riesgo medioambiental en los residuos minero metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España.
- González-Alcaraz, M.N., van Gestel, C.A.M. 2015. Climate change effects on enchytraeid performance in metal-polluted soils explained from changes in metal bioavailability and bioaccumulation. *Environmental Research*, 142: 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.06.027>.
- González-Alcaraz, M.N., van Gestel, C.A.M. 2016. Toxicity of a metal(loid)-polluted agricultural soil to *Enchytraeus crypticus* changes under a global warming perspective: variations in air temperature and soil moisture content. *Science of the Total Environment*, 573: 203-211. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.061>.
- Oreja, B., Goberna, M., Verdú, M., Navarro-Cano, J.A. 2020. Constructed pine log piles facilitate plant establishment in mining drylands. *J. Environ. Manag.* 271, 111015.
- Párraga-Aguado, I., González-Alcaraz, M.N., Álvarez-Rogel, J., Jiménez-Cárceles, F.J., Conesa, H.M. 2013. The importance of edaphic niches and pioneer plant species succession for the phytomanagement of mine tailings. *Environmental Pollution*, 176: 134-143. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.023>.
- Párraga-Aguado, I., Querejeta, J.I., González-Alcaraz, M.N., Jiménez-Cárceles, F.J., Conesa, H.M. 2014a. Elemental and stable isotope composition of *Pinus halepensis* foliage along a metal(loid) polluted gradient: implications for phytomanagement of mine tailings in semiarid areas. *Plant and Soil*, 379: 93-107. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2038-4>.
- Párraga-Aguado, I., Querejeta, J.I., González-Alcaraz, M.N., Jiménez-Cárceles, F.J., Conesa, H.M. 2014b. Usefulness of pioneer vegetation for the phytomanagement of metal(loid)s enriched tailings: grasses vs. shrubs vs. trees. *Journal of Environmental Management*. 133:51-58. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.001>.
- Robinson, B.H., Bañuelos, G., Conesa, H.M., Evangelou, M.W.H., Schulin, R. 2009. The Phytomanagement of Trace Elements in Soil. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28: 240-266. <https://doi.org/10.1080/07352680903035424>.

2.8. Experiencias previas en la restauración de IRMA de la Sierra Minera. Restauración ecológica (proyecto Tetraclinis)

AUTORES: Cristian Marcelo Muñoz Maluenda, Juan Miguel Moya Pérez, José Antonio Navarro Cano, Miguel Ángel Esteve Selma.

2.8.1. Introducción

Cualquier proyecto de restauración persigue recuperar la composición, integridad y funciones de un ecosistema dañado, tomando como modelo un ecosistema de referencia (Gann et al 2019). Esta definición general no elude la dificultad que entraña alcanzar estos objetivos cuando la historia de degradación es tan amplia que se desconocen rasgos clave del ecosistema original, o cuando el ecosistema ha sido eliminado o severamente alterado. En esos casos, los estándares de restauración aceptan interpretaciones laxas, permitiéndose centrar la restauración en la recuperación de la funcionalidad del área perturbada y de su dinámica autoecológica (Navarro-Cano et al 2017).

La minería metálica es una de las actividades industriales de mayor impacto ambiental a escala global. En Europa, el 60% de los sitios contaminados están relacionados con actividades mineras, de los cuales, menos del 10% han sido sometidos a programas de rehabilitación o restauración (Panagos et al 2013). La minería metálica genera depósitos de residuos que no solo plantean problemas de estabilidad estructural, sino que además mantienen altas concentraciones de elementos traza (metales pesados y metaloides) potencialmente tóxicos y altamente movilizables por erosión eólica o por las aguas de escorrentía (Mendez y Maier 2008). El escenario más desfavorable para la restauración de estos suelos contaminados se da cuando al estrés derivado de su toxicidad y escasa estructura se une un estrés climático, como la escasez de precipitaciones y elevada radiación.

En la Sierra Minera de Cartagena y La Unión se da la mayor concentración de depósitos de residuos de minería metálica abandonados de la Península Ibérica. Tras el abandono de estas instalaciones entre los años 70 y 80 del pasado siglo, tan solo 13 de los 83 depósitos inven-

tariados por el IGME (2002) han sido sometidos a algún programa de restauración. El largo periodo de tiempo transcurrido entre la primera y la última actuación de restauración (>30 años) ha dado lugar a cambios en los objetivos, la metodología seguida y las tecnologías disponibles en cada momento. Así, se ha pasado de la mera rehabilitación de suelos mediante cubrición con suelo superficial, al aislamiento con una capa impermeable o la inertización de metales mediante enmiendas inorgánicas y orgánicas. Estas metodologías se han combinado a menudo con la fitoestabilización de las superficies restauradas, en donde se observa una evolución desde el uso de especies alóctonas preferentemente arbóreas, al uso predominante de especies locales arbustivas, de matorral y pastizal (Tordoff et al., 2000; Gómez-Ros et al., 2013; Mendez y Maier, 2008; Zornoza et al 2012; Arranz González et al 2019; Ona et al 2021).

Existen multitud de trabajos acerca de aspectos relacionados con los suelos y vegetación de algunos de estos depósitos, (e.g. Ottenhof et al 2007; Conesa y Schuling 2010; Gómez-Ros et al., 2013; Navarro-Cano et al 2018). También se cuenta con una evaluación del riesgo de contaminación y fallo estructural de 20 de estos depósitos, entre los que se incluyen cuatro sometidos a algún programa de restauración (IGME 2011). Dicha evaluación se basa en una categorización semicuantitativa de los criterios de probabilidad y severidad de escenarios de riesgo de cada depósito, sin comparativa entre depósitos. Sin embargo, el muestrario de posibles soluciones de restauración ensayadas en la zona permite comparar el resultado de distintas intervenciones para intentar mejorar el éxito de los nuevos programas de restauración. El objetivo del trabajo aquí presentado ha sido realizar un análisis semicuantitativo comparado de la evolución de 10 depósitos sometidos a algún programa de restauración en la Sierra Minera hasta la fecha.

2.8.2. Metodología

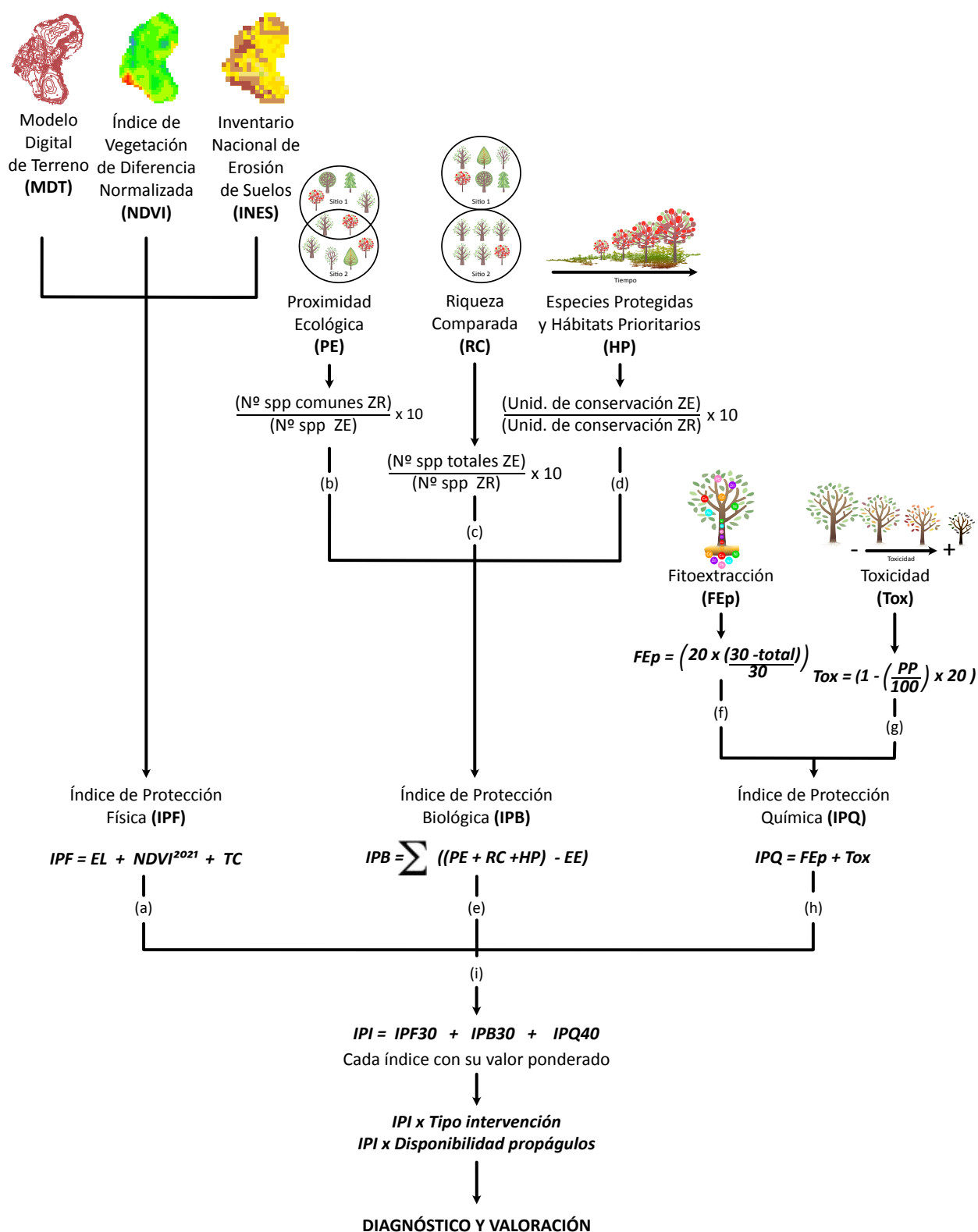


Figura 1. Resumen metodológico. Las letras representan las siguientes fórmulas: **IPF** (a); **PE** (b); **RC** (c); **HP** (d); **IPB** (e); **FEp** (f); **Tox** (g); **IPQ** (h); **IPI** (i) y modelos aplicados (j). **ZR:** zona de referencia; **ZE:** zona evaluada; **SPP:** especies; **EE:** especies exóticas; **EL:** erosión laminar; **NDVI²⁰²¹:** índice de vegetación de diferencia normalizada del 2021; **TC:** tasa de crecimiento.

Para el diagnóstico de la evolución de los depósitos objeto de estudio se ha utilizado un enfoque mixto, empleándose criterios cuantitativos y cualitativos, que ha permitido establecer una valoración estandarizable y replicable, capaz de cumplir el objetivo planteado. Para ello se ha creado un

índice de protección integrado (IPI), que incorpora ponderadamente información cuantitativa de parámetros físicos, químicos y biológicos de cada depósito (**Figura 1**). Este índice ha sido utilizado para comparar y jerarquizar el estado de los depósitos.

Área de estudio y tipo de intervención de cada depósito

DENOMINACIÓN	ÁREA (M²)	TÉCNICA	TI CONCA	A.F.I.	COORDENADAS UTM
Marqués de Péjar (MP)	187.000	IT	2	1991	(690328, 4166718)
Los Pajarillos (LP)	41.000	IT	2	1991	(690221, 4166358)
Periferia Cabezo Rajao (PCR)	135.000	IC ½	1	1991	(685566, 4165576)
Cuesta Las Lajas (CLL)	25.000	IT	2	2011	(687831, 4165030)
Segunda Primavera (MSP)	1.500	IC	3	2005	(689480, 4167099)
San Cristóbal II (MAZ)*	19.500	TEC	4	2015	(647283, 4162754)
Santa Antonieta (MSA)	16.000	TEC	4	2015	(686576, 4162859)
El Gorguel (EG)	2.300	TEC	4	2015	(687126, 4162240)
Peña del Águila II (PA II)	6.000	IC ¼	0,5	2018	(690911, 4164230)
Balsa Jenny (BJ)	92.000	IC	3	2011	(691116, 4165952)
Peña del Águila III (PA III)	26.000	C	0	-	(691334, 4164204)
El Madroñal (EM)	52.000	C	0	-	(692243, 4162560)

Tabla 1. Denominación de los sitios, área (m²), técnica de intervención aplicada, valoración cualitativa de la intervención (TI-CONCA), año final estimado de la intervención (AFI) y coordenadas UTM del punto central del estudio exploratorio.

* San Cristóbal II se evalúa solo en composición biológica. TEC: Aplicación tecnosuelo y/o enmienda; IT: Intervención tradicional con aportes adicionales para inertizar o impermeabilizar; IC: Intervención convencional; IC ½: Intervención convencional a media área evaluada; IC ¼: Intervención convencional a 1/4 del área evaluada; C: Área sin intervenir (control).

La investigación se desarrolló entre junio de 2022 y mayo de 2023. El área de estudio (**Figura 2**) se localizó en los términos municipales de Cartagena, La Unión y Mazarrón (Murcia). Se ha evaluado un área total de 671.300 m², divididos en 12 áreas, que incluyen 10 depósitos restaurados, un depósito abandonado y un área libre de contaminación (**Tabla 1**). Del

total definido inicialmente se concretó el análisis de composición biológica para 603.300 m² y el análisis de protección integrado (IPI) para 583.800 m². Las áreas fueron definidas mediante la delimitación digital de polígonos, que fluctuaron entre 187.000 m² y 1.500 m², reflejándose ejemplos de su tipología en la **Figura 3**.

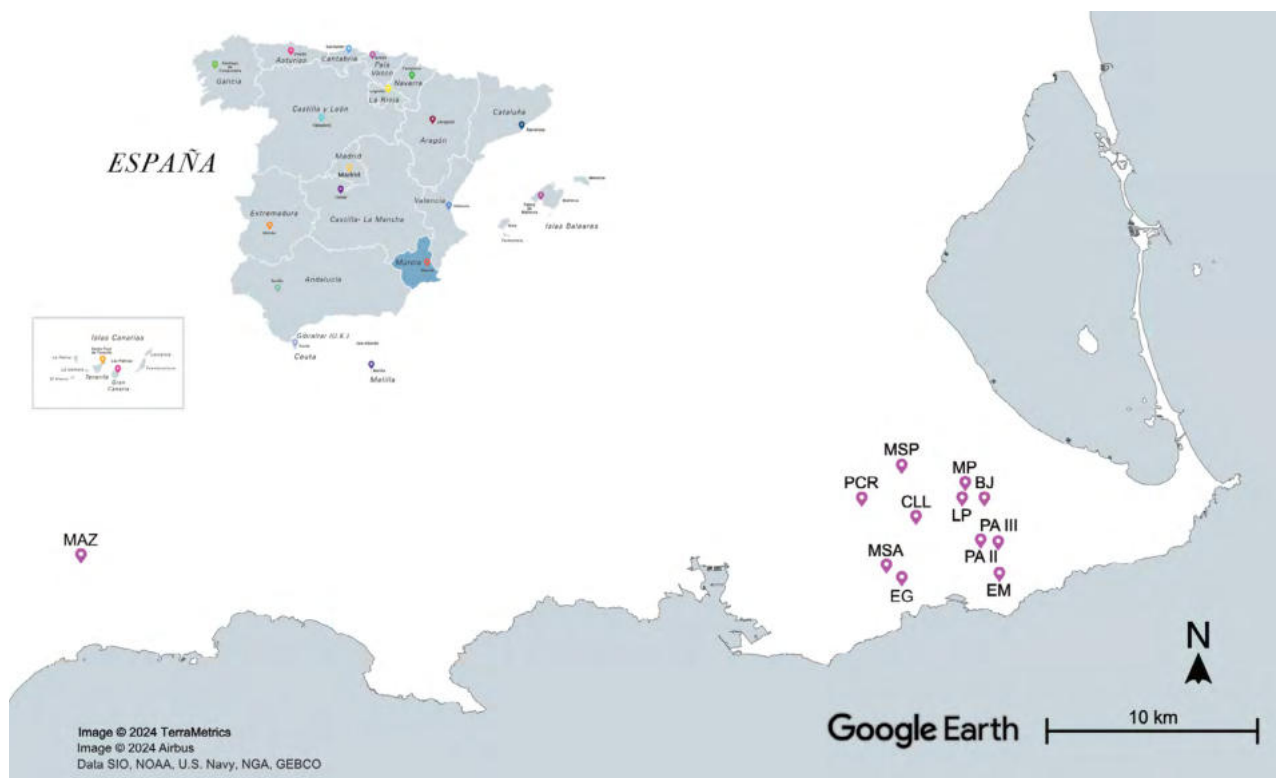


Figura 2. Sitios evaluados. San Cristóbal II - Mazarrón (MZ), Segunda Primavera (MSP), Periferia Cabezo Rajao (PCR), Cuesta Las Lajas (CLL), Marqués de Péjar (MP), Los Pajarillos (LP), Balsa Jenny (BJ), Peña del Águila II (PA II), Peña del Águila III (PA III), Mina Santa Antonieta (MSA), El Gorguel (EG), El Madroñal (EM). (Fuente: Adaptación de Google Earth).



Figura 3. Representación fotográfica de algunos de los sitios evaluados. Arriba: vista general de Los Pajarillos (LP), tomada desde la zona de ingreso a Marqués de Péjar (MP). Abajo se reportan imágenes de Santa Antonieta (MSA) y Peña del Águila II (PA II), además de una toma amplia de la zona de Segunda Primavera (MSP).

Criterio de valoración cualitativa del tipo de intervención en cada depósito

A cada una de las 12 zonas de estudio se le asignó un valor entre 4 y 0, siguiendo un orden decreciente en el grado de complejidad y tecnificación de la intervención: **4** (aplicación de tecnosuelos y/o enmiendas con materia orgánica); **3** (sellado tradicional con aportes adicionales para inertizar o impermeabilizar); **2** (sellado tradicional); **1** (intervención convencional en la mitad del área evaluada); **0,5** (intervención convencional en $\frac{1}{4}$ del área); **0** (áreas sin intervención, tomadas como controles del modelo), asignando esta gradiente a la variable CONCA (**Tabla 1**). Esta escala inicial se complementó con una gradiente de distancia de las áreas analizadas a espacios o zonas conservadas. Se estableció un rango entre 3 y cero con valores decrecientes: **3** (distancia considerable a zonas conservadas y entorno muy alterado ambientalmente), **2** (distancia media a zonas conservadas y entorno con vegetación de calidad media a baja), **1** (distancia corta respecto a zonas conservadas y vegetación en calidad y complejidad de calificación media) y **0** (áreas que están inmersas en matrices de áreas protegidas).

Índice de protección física (IPF)

La estimación del IPF (**Figura 1a**) se basó en la evaluación de información disponible a través de sensores remotos, considerando que cada polígono correspondía a un área de estudio. Inicialmente se utilizó información de bases de datos de Modelos Digitales de Terreno (MDT), lo cual permitió crear modelos digitales con curvas de nivel (0,5 m resolución). Esta información permitió establecer la presencia de zonas endorreicas, con el objeto de analizar flujos preferentes del agua superficial. Por otra parte, se realizó un análisis de la información de los procesos erosivos, combinando la información del área digitalizada con las bases de datos disponibles en el servidor de visualización de mapas (WMS Inspire), del directorio de servicios de actividad del área de Biodiversidad y Bosques, asociados al Banco de Datos de la Naturaleza (BDN), del MITERD. Se pudo distinguir diferentes tipos de erosión (de cauces, eólica, laminar y potencial) y, además los movimientos en masa para el año disponible. La última herramienta utilizada para construir el IPF fue el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en base a imágenes LANDSAT 8. El análisis de cobertura vegetal fue realizado en una ventana temporal acotada entre los años 2013 y 2021. Adicionalmente se estimó la tasa de crecimiento anual, basadas en los cambios en el NDVI.

El IPF se construyó mediante la asociación de valores que comparaban el valor por zona de la erosión laminar, el valor NDVI del 2021 o ajustado a 10 años, y los valores de las tasas de crecimiento anuales estimadas, relacionando los valores de cada sector respecto a los obtenidos en la zona control (EM). La erosión laminar se ha estimado en ton/ha/año. Los valores de NDVI corresponde al año 2021, excepto CLL, MSA, EG y PA II cuyos valores se obtuvieron partir de una proyección a 10 años. Las tasas de crecimiento se obtuvieron a partir de los valores ajustados a 10 años. La fórmula final (**Figura 1a**) se consigue mediante una suma aritmética.

Índice de protección biológica (IPB)

Las zonas se definieron en concordancia a los polígonos descritos mediante sensores remotos. El número de puntos de muestreo se estableció mediante una aproximación con logaritmo neperiano (ln), en función del área de cada sitio. En total, se evaluaron 12 zonas (93 puntos), distribuidos como sigue: MP (n=10), LP (n=7), PCR (n=8), CLL (n= 9), MSP (n=5), MSA (n= 7), EG (n=5), PA II (n=7), BJ (n=8), PA III (n=8), EM (n=10) y MAZ (n=9). Las visitas a terreno fueron entre julio del 2022

y febrero del 2023. Los valores de EM corresponden a información histórica recopilada por los autores.

En terreno se seleccionaron los puntos de muestreo de manera aleatoria, considerando principalmente las zonas de meseta. En cada uno de los sitios se seleccionó un punto central, desde donde se estableció un radio de 5 metros (78,5 m² por punto). Cada sitio fue georreferenciado y se procedió a caracterizar, de manera porcentual, las coberturas de especies identificadas *in situ*.

Para comprender mejor la configuración biológica de cada sitio, se caracterizaron las diez especies más abundantes, considerando además la abundancia acumulada de estas especies dominantes. Adicionalmente se realizó una subdivisión por tipo biológico (TB). Las categorías de tipos biológicos fueron árboles (TB1); arbustos (TB2); matorrales (TB3); "hierbas perennes rastreras" (TB4) y especies herbáceas anuales (TB5).

Los principales estimadores utilizados fueron proximidad ecológica (**Figura 91.b**); riqueza comparada (**Figura 91.c**); especies protegidas y hábitats prioritarios (**Figura 91.d**); además de los valores integrados de especies exóticas, cuya estimación se realizó de la siguiente forma:

Especies exóticas e invasoras (EE):

$$EE = (1 \times 5\% \text{ cobertura EEI}) + (1 \times 10\% \text{ EENI}) \times (-10)$$

Se entenderá EEI (especie exótica invasora) y EENI (especie exótica no invasora). El total obtenido se multiplica por -10, porque el valor total resta a los valores anteriores (**Tabla 3**). Adicionalmente fue estimada la riqueza y adicionalmente el índice de diversidad de Jaccard, para contrastar los resultados.

El IPB (**Figura 1e**) fue estimado mediante la comparación de los valores de la suma aritmética de los resultados obtenido en PE, RC y HP, restandose los valores de EE. Los valores finales son obtenidos comparando la zona de estudio (ZE) y la zona de referencia (ZR).

Índice de protección química (IPQ)

La estimación del IPQ se realizó en tres fases: recolección de material vegetal en terreno; análisis de laboratorio y estimación de concentraciones de metal(oides) por especie analizada (mg/kg); y interpretación de la información. Se estimaron los resultados de bioacumulación porcentual (FEp) y toxicidad (Tox), registradas para cada una de las especies vegetales analizadas en laboratorio.

La recolección fue realizada entre los días 19 y 20 de octubre de 2022. Las muestras fueron acondicionadas para su análisis de laboratorio mediante un triple lavado con agua destilada y agua corriente y posterior secado en condiciones de temperatura ambiente, durante 72 horas. La extracción en laboratorio, para cada uno de los seis elementos analizados (As, Cd, Cu, Mn, Pb, Zn), se realizó mediante los procedimientos habituales.

a) Estimación de bioacumulación (FEp):

El cálculo ponderado del valor total de tóxicos presentes en cada una de las áreas estudiadas se realizó estimando una media ponderada del valor tabulado, de cada una de las especies recolectadas, por la abundancia específica de cada especie vegetal, dividiéndose por el valor de la cobertura total, que incorporaba la suma de las especies incluidas. Sólo se trabajó con los valores asociados a las especies recolectadas en terreno para ser analizadas en laboratorio, y de las cuales se tuvo resultados positivos. La fórmula aplicada fue la siguiente:

$$FEp = \frac{\sum ((\text{valor tab } sp1 * \text{Abundancia } sp1) + (\text{valor tab } spn * \text{Abundancia } spn))}{\text{cobertura total especies recolectadas}}$$

Posteriormente, con el valor para cada zona, que representaba la relación entre la concentración de metales y metaloides y las coberturas de las especies, en términos ponderados a la cobertura total de la suma de las especies recolectadas en cada zona, se realiza el cálculo del FEp (Figura 1). La estimación final del valor tabulado de extracción química se realiza sobre la base de que el valor crítico se ubicará en el valor tabulado 5, equivalente a un valor máximo de un 25% de extracción. Considerando que se está trabajando con 6 elementos, el valor fijo estimado para la calidad del parámetro es de 30. El valor resultante fue ponderado por 20%.

b) Estimación de toxicidad (Tox):

La toxicidad específica para las especies vegetales y la variación asociada a las muestras recolectadas se determinó estimando un promedio ponderado por la cantidad de réplicas para cada sitio (Figura 1g). Se trabajó con los valores de muestras definidas como tóxicos para las plantas, en función de criterios de toxicidad estandarizados (Kabata-Pendias 2010). Se contabilizaron los casos donde se superaba el valor mínimo y el número de veces que se superaba el valor máximo (ambos capaces de provocar daños en plantas). Los valores máximos fueron valorados con una ponderación de dos veces los valores mínimos.

La fórmula aplicada en cada caso es la siguiente:

$$\text{Porcentaje ponderado (PP)} = (\sum \text{valores mínimos} + (\sum \text{valores máximos} * 2)) / n^{\circ} \text{ réplicas}$$

Finalmente, el valor de Tox se estimó utilizando este porcentaje ponderado (PP), aplicando un 20% a su estimación final (Figura 1g).

Se consideró un valor mínimo de calidad 0 cuando hay un 100% de muestras con superación del mínimo o 50% del valor máximo, o combinaciones equivalentes. Valores más altos dan valores negativos. Se ponderaron sobre 20% para la combinación lineal final.

El IPQ (Figura 1h) se estima sumando aritméticamente FEp y Tox.

Índice de protección integrado (IPI)

La estimación del índice de protección integrado (IPI) se obtuvo mediante la integración de indicadores previamente estimados y ponderados de manera diferenciada, con un 30% para IPF e IPB y 40% para IPQ (Figura 1i).

2.8.2. Resultados

Índice de protección física (IPF)

Los resultados consolidados de los IPF reflejan las valoraciones finales obtenidas, en función de los valores de erosión (INES), el NDVI del último año (2021), o ajustado a 10 años (Tabla 2).

Las tasas de crecimiento, para cada zona (Figura 4a), confirman las tendencias asociadas al IPF

(Tabla 2). El análisis de erosión laminar (Figura 4b) reflejó como óptimo un valor de 8 ton/ha/año ($R^2 = 0,77$; $NDVI > 0,3$). Adicionalmente la relación entre tasa de crecimiento y el NDVI del año 2021 (Figura 4c) confirmó las tendencias preliminares. También se pudo evidenciar que la existencia de zonas endorreicas en las balsas tiene un efecto positivo significativo ($R^2 = 0,73$, $F = 21,8$, $p = 0,0016$), en el éxito de la restauración.

ZONAS	ER (LAMINAR)	NDVI	RELACIÓN TC	IPF
MP	12,26	8,195	8,162	28,62
LP	9,72	8,320	7,129	25,17
PCR	0,48	5,643	4,316	10,44
CLL	6,95	6,136	7,650	20,74
MSP	3,17	5,839	2,486	11,49
MSA	2,56	3,206	-0,308	5,46
EG	9,50	4,926	-0,211	14,21
PA II	2,98	3,355	2,699	9,03
BJ	9,40	6,646	4,209	20,26
PA III	8,57	7,898	8,084	24,55
EM	10,00	10,000	10,000	30,00

Tabla 2. Estimación de índice de protección física (IPF), para las zonas estudiadas.

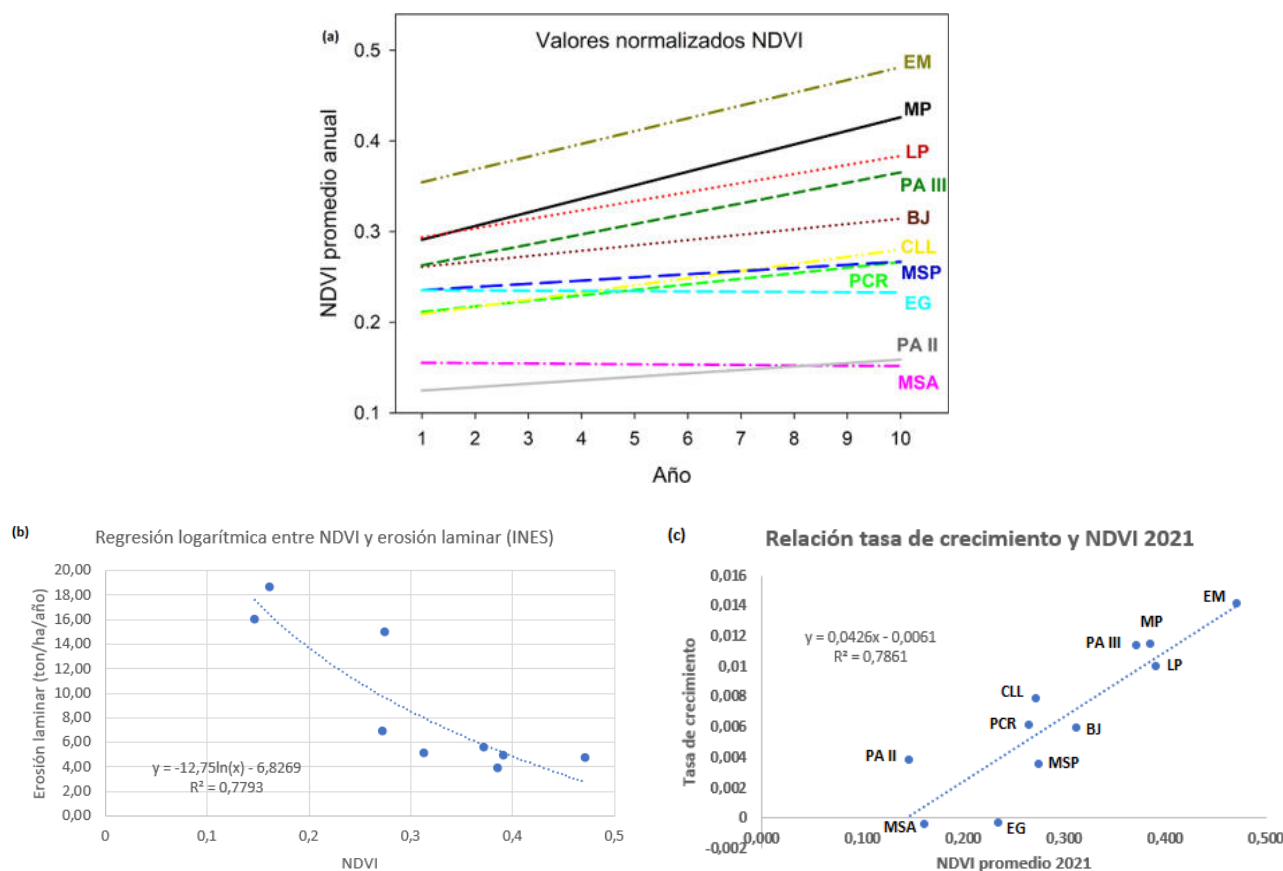


Figura 4. Serie de tiempo normalizada de valores promedios anuales de NDVI, para un horizonte de 10 años (a) que reflejan las tasas de crecimiento para las zonas analizadas, (b) regresión logarítmica entre la erosión laminar (ton/ha/año) y el NDVI del año 2013; (c) relación entre la tasa de crecimiento y el valor NDVI del año 2021 y (d) relación entre las zonas capaces de acumular agua y la cobertura vegetal alcanzada.

Índice de protección biológica (IPB)

El resumen de los resultados de la aplicación del IPB se ven reflejado en la **Tabla 3**.

CRITERIO	MP	LP	PCR	CLL	MSP	MSA	EG	PAII	BJ	PAIII	MAZ	EM
PE	4,4	5,8	2,6	3,6	3,5	4,3	0,8	5,8	3,1	5,0	3,3	10
RC	5,8	6,1	6,1	8,1	6,5	4,5	3,9	6,1	8,4	3,9	4,0	10
PH	3,5	3,5	0,6	3,5	2,4	0	0	6,5	1,8	2,9	0	10
Suma	13,7	15,4	9,3	15,2	12,4	8,8	4,7	18,4	13,3	11,8	7,3	30
EE	-2,66	-3,85	-1,59	-0,01	0	0	-0,04	0	-0,55	0	-1,1	0
IPB	11,04	11,55	7,71	15,19	12,4	8,8	4,66	18,4	12,7	11,8	6,2	30
R	18	19	19	25	20	14	12	19	26	12	15	37
H'	2,95	3,07	2,80	3,15	3,54	2,68	2,55	3,58	2,54	2,05	2,58	2,75

Tabla 3. Se registran valores obtenidos de proximidad ecológica (PE); riqueza comparada (RC); especies protegidas y hábitats prioritarios (P&H); especies exóticas (EE); índice de protección biológica (IPB); riqueza e índice de diversidad de Shannon (H').

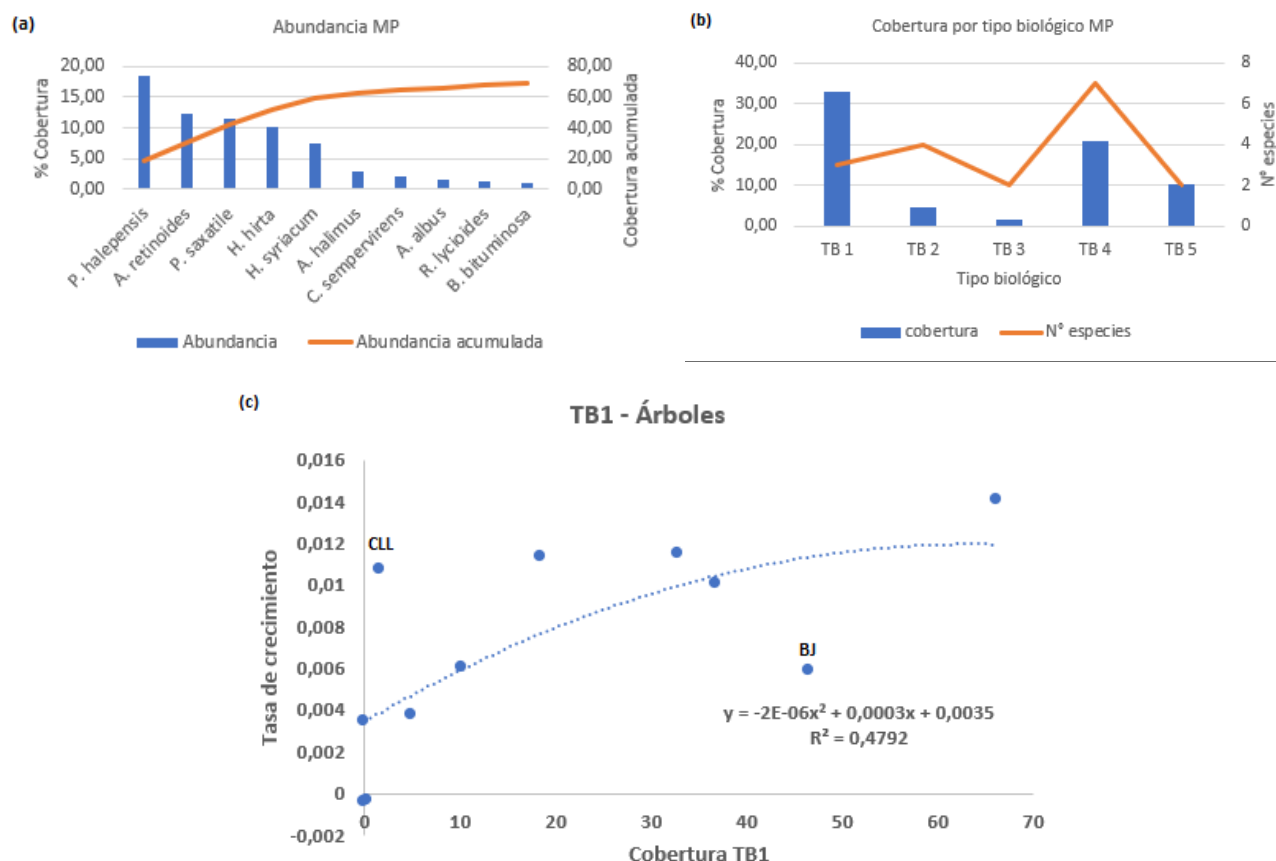


Figura 5. Representación de abundancia por especies (a) y acumulada (b) para el caso de MP y la relación polinómica (c) de la tasa de crecimiento y la cobertura del tipo biológico 1 (TB1), asociado a las especies arbóreas para todas las zonas.

Se presentan como caso de ejemplo los resultados de MP, para representar las abundancias para cada una de las principales especies y la abundancia acumulada (**Figura 5a**) y su resultado, por tipo biológico

(**Figura 5b**), además de la relación polinómica de la tasa de crecimiento y la cobertura del tipo biológico arbóreo (TB1) para la totalidad de las zonas analizadas (**Figura 5c**).

Índice de protección química (IPQ)

Los resultados (**Tabla 4**) de IPQ reflejan la suma de las estimaciones de bioacumulación (FEx) y toxicidad (Tox).

ZONA	MP	LP	PCR	CLL	MSP	MSA	EG	PA II	BJ	PA III
FEP	12,8	14,0	11,1	11,8	13,6	13,1	10,6	13,6	13,2	15,3
Tox	17,8	14,8	12,8	17,2	12,0	14,0	8,40	15,4	13,4	14,6
IPQ40	30,6	28,8	23,9	29,0	25,6	27,1	19,0	29,0	26,6	29,9

Tabla 4. Estimación de valores FEP, Tox y IPQ40 para cada uno de los sitios de estudio.

Índice de protección integrado (IPI)

La consolidación de la información de observa en el IPI (**Tabla 5**), indicándose la integración de los indicadores.

ZONA	MP	LP	PCR	CLL	MSP	MSA	EG	PA II	BJ	PA III
IPF30	28,6	25,2	10,4	20,7	11,5	5,5	14,2	9,0	20,3	24,5
IPB30	11,0	11,5	7,7	15,2	12,4	8,8	4,6	18,4	12,7	11,8
IPQ40	30,6	28,8	23,9	29,0	25,6	27,1	19,0	29,0	26,6	29,9
IPI	70,2	65,5	42,0	64,9	49,5	41,4	37,8	56,4	59,6	66,2

Tabla 5. Estimación de índice de protección integrado (IPI) para las zonas de estudio.

Modelos por tipos de actuaciones

Al analizar los modelos logísticos respecto de la aplicación de las variables cualitativas informadas se observa que mantienen, en general, una relación negativa con la calidad final obtenida en la restauración, con un óptimo en las

intervenciones más sencillas (**Figura 6a**). En tanto, se registra un ajuste creciente al analizar los modelos de actuaciones respecto a la tasa de crecimiento y la combinación entre la tasa de crecimiento y la distancia a la fuente de propágulos (**Figura 6b**). Esta última combinación representa el mejor ajuste con un 91% de varianza absorbida.

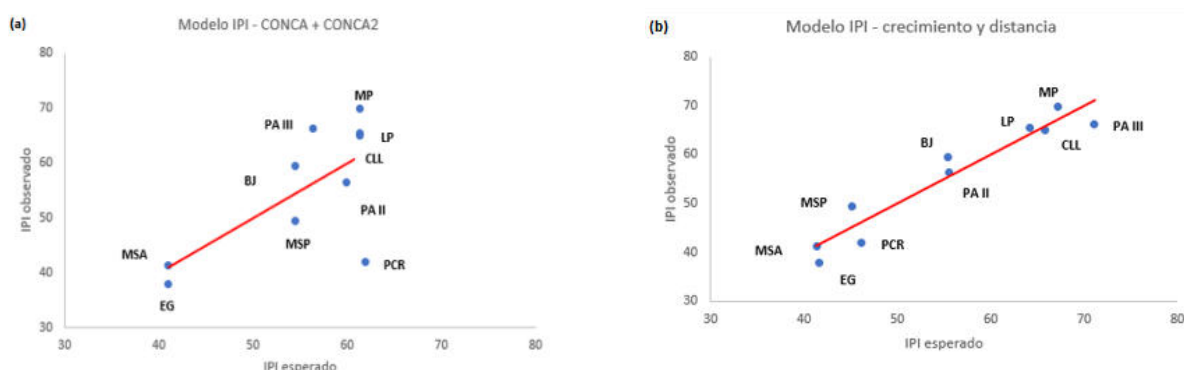


Figura 6. Relación (a) obtenida a contrastar los modelos de intervención (CONCA + CONCA2) y los valores observados y esperados del índice de protección integral (IPI) y (b) al contrastar valores observados del índice IPI y los esperados en función de la tasa de crecimiento anual y la distancia a zonas de alta calidad ambiental.

2.8.3. Conclusiones

- 1) Las herramientas digitales (MDT), los sensores remotos (NDVI) y los datos históricos digitales disponibles en temas de erosión (INES), permiten construir un índice de protección física (IPF) fiable y de bajo costo.
- 2) La condición actual de la restauración se relacionó directamente con elementos estructurales de la balsa como las pendientes y la presencia o ausencia de zonas endorreicas, con el tipo de especies presentes y sus tasas anuales de crecimiento. Como valores de referencia o umbrales, tendríamos un NVDI de 0,3, una cobertura vegetal mínima estimada en un 60%, una tasa de crecimiento anual de 0,01 del NVDI y una cobertura basal de un 20% de especies de tipo arbóreo. La presencia de áreas endorreicas en las estructuras facilita de forma significativa la restauración.
- 3) Se ha obtenido un índice de protección biológica, que responde a la composición y riqueza de especies y a su calidad ecológica, en relación con un área de referencia. Los valores obtenidos en este índice estructural y composicional de la vegetación parecen tener conexión con la función de protección química.
- 4) Los elementos químicos más relevantes, de acuerdo con los resultados en muestras foliares fueron As, Cd, Cu, Mn, Pb y Zn. Las especies cuyos valores fueron más significativos en términos negativos fueron *Dittrichia viscosa*, *Phagnalon saxatile* y, en un rango menor, *Helichrysum decumbens*, todas ellas asteráceas o compuestas. Los arbustos y árboles son los tipos biológicos que menos metales pesados acumulan.
- 5) De acuerdo con los resultados obtenidos a través del Índice de Protección Integrado (IPI), los depósitos que presentaron peor evaluación fueron EG, MSA, PCR y MSP. Los mejores resultados se asociaron a MP, PA III, LP, CLL y BJ y PA II.
- 6) El índice de Protección integral mantiene en general una relación negativa con la complejidad de la intervención y, en consecuencia, se estima que el nivel de inversión no está relacionado positivamente con los resultados observados en las restauraciones analizadas.
- 7) Los factores más importantes en la determinación del resultado final de la restauración parecen estar asociados a la cobertura arbórea, la tasa de crecimiento anual de la cobertura vegetal y a la cercanía de áreas bien conservadas limítrofes, que aporten propágulos que faciliten los procesos de colonización espontánea.
- 8) Lecciones aprendidas: una mayor tecnificación de las intervenciones de rehabilitación de suelos mineros no garantiza una mayor recuperación de funciones ecológicas con respecto a intervenciones menos tecnificadas. Por ello, es fundamental redimensionar el coste/beneficio de cada intervención, según los objetivos de cada proyecto.

Bibliografía

- Arranz González, J.C., Rodríguez Gómez, V., Rodríguez Pacheco, R., Fernández Naranjo, F.J., Vadillo Fernández, L., y Alberruche del Campo, E. 2019. Guía para la rehabilitación de instalaciones abandonadas de residuos mineros. Ministerio para la Transición Ecológica. 644 p.
- Conesa, H. M., & Schulin, R. (2010). The Cartagena-La Unión mining district (SE Spain): A review of environmental problems and emerging phytoremediation solutions after fifteen years research. *Journal of Environmental Monitoring*, 12, 1225-1233.
- Gómez-Ros, J.M.; García, G.; Peñas, J.M. Assessment of restoration success of former metal mining areas after 30 years in a highly polluted Mediterranean mining area: Cartagena-La Unión. *Ecol. Eng.* 2013, 57, 393-402.
- IGME. 2002. Actualización del Inventario Nacional de Depósitos de lodos en proceso de tratamiento de industrias extractivas. Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME. 2011. Inventario de instalaciones mineras cerradas o abandonadas 2011. Instituto Geológico y Minero de España.
- Kabata-Pendias, A. (2010). Trace Elements in Soils and Plants (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158%0A>
- Mendez, M.O., Maier, R.M., 2008. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments—an emerging remediation technology. *Environ. Health Perspect.* 116, 278-283.
- MITERD. 2023. Marco de Actuaciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. NIPO: 665-21-073-4. 54 pp.
- Oná, M. B., Goberna, M., & Navarro-Cano, J. A. (2021). Natural Seed Limitation and Effectiveness of Forest Plantations to Restore Semiarid Abandoned Metal Mining Areas in SE Spain. *Forests*, 12(5), 548.

- Navarro-Cano, J. A., Verdú, M., & Goberna, M. (2018). Trait-based selection of nurse plants to restore ecosystem functions in mine tailings. *Journal of applied ecology*, 55(3), 1195-1206.
- Navarro-Cano, J.A., Goberna, M., González-Barberá, G., Castillo, V.M., Verdú, M. 2017. Restauración ecológica en ambientes semiáridos: recuperar las interacciones biológicas y las funciones ecosistémicas. Editorial CSIC, 159 pp. (NIPO: 059-17-056-9). https://www.uv.es/cide/Documentos/RESTAURACION_ECOLOGICA.%20Libro.pdf
- Ottenhof, C. J. M., Faz, A., Arocena, J. M., Nierop, K. G. J., Verstraten, J. M., & Van Mourik, J. M. (2007). Soil organic matter from pioneer species and its implications to phytostabilization of mined sites in the Sierra de Cartagena (Spain). *Chemosphere*, 69(9), 1341-1350.
- Panagos, P.; Van Liedekerke, M.; Yigini, Y.; Montanarella, L. Contaminated sites in Europe: Review of the current situation based on data collected through a European network. *J. Environ. Public Health* 2013, 2013, 158764.
- Tordof, G. M., Baker, A. J. M., & Willis, A. J. (2000). Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere*, 41, 219-228.
- Zornoza, R., Faz, A., Carmona, D. M., Martínez-Martínez, S., & Acosta, J. A. (2012). Plant cover and soil biochemical properties in a mine tailing pond five years after application of marble wastes and organic amendments. *Pedosphere*, 22(1), 22-32.



**ACTUACIONES PLANTEADAS
PARA LA RECUPERACIÓN INTEGRAL
DE LA SIERRA MINERA**

BLOQUE 3

3.1. Catálogo general de soluciones contempladas: remediación de depósitos mineros, espacios degradados y cómo afrontarlos

AUTORES: Jaime Talavera Sánchez, Juan Manuel Domingo Muñoz, Nadia García Ruiz.
Grupo TRAGSA. Delegación Murcia.

3.1.1. Introducción

Las soluciones técnicas propuestas son el eje central de la remediación ambiental, ya que abordan directamente los principales desafíos estructurales y ambientales del área afectada en la Sierra Minera, a través de los proyectos que derivan de la **línea 2.3. del MAPMM**, que consisten en:

- **9 conjuntos mineros** que contienen Instalaciones de Residuos Mineros Abandonados (IRMAs), también llamadas “depósitos” o “balsas/presas mineras”, cuya compleja ejecución se desarrolla a través de numerosos proyectos de ejecución.
- **6 zonas de restauración hidrológico-forestal (RHF)**, buscando actuar sobre las laderas y vaguadas muy modificadas por la actividad minera, pero que no constituyen estrictamente depósitos mineros, sino terrenos con diferentes niveles de afección y contaminación y, por lo general, con escasa vegetación.

Estas soluciones persiguen la estabilización de suelos contaminados, la mejora de coberturas vegetales

para prevenir la erosión, así como la implementación de sistemas de drenaje sostenible que gestionan eficazmente las aguas pluviales entre otros.

Además, estas soluciones funcionan de manera conjunta con las planteadas en las ramblas de Dominio Público Hidráulico por la Confederación Hidrográfica del Segura dentro de la línea 2.2. del MAPMM: *Renaturalización y mejora ambiental de las Ramblas y creación de corredores verdes que doten de conectividad a toda la red de drenaje, en especial en las ramblas afectadas por la minería.*

Los próximos capítulos expondrán en detalle las soluciones definidas, dividiéndolas según el tipo de entorno a tratar:

- Aplicación de soluciones a **las IRMAs y sus entornos**, terrenos contaminados.
- Aplicación de soluciones a la **restauración hidrológico-forestal (RHF)**.
- Aplicación de soluciones al **Dominio Público Hidráulico (ramblas mineras)**.



Depósito Descargador II (Conjunto 5): estado actual



Depósito Descargador II (Conjunto 5): imagen objetivo

Figura 1a. Comparativa del estado actual y de estado tras la realización de la restauración.



Figura 1b. Comparativa del estado actual y de estado tras la realización de la restauración.

3.1.2. Soluciones contempladas. Estudio de alternativas y metodología para la priorización de actuaciones

En primer lugar, se realizó una priorización de objetivos según su nivel de importancia, teniendo en cuenta que el objeto principal de los proyectos es evitar o reducir la llegada de contaminantes al Mar Menor, esto se consigue:

- 1) Evitando el **aporte de metales pesados** contenidos en los residuos mineros y arrastrados por el agua de **escorrentía** a través de las ramblas hasta desembocar en el Mar Menor, suponiendo una de las causas del deterioro de la laguna y su entorno.
- 2) Garantizando la **estabilidad estructural** de las instalaciones de residuos mineros a largo plazo, protegiendo la seguridad de la fauna y las personas.

- 3) Impidiendo la dispersión eólica de los residuos mineros almacenados en la zona.
- 4) Restauración del paisaje forestal y su integración en el entorno.

Una vez realizada la priorización de objetivos, se realizaron informes/documentos (R) o se recopiló información publicada por distintos organismos (RP) para conocer el estado en cuanto a restauración de espacios degradados por la minería.

La siguiente tabla, sin ser exhaustiva, corresponde con los documentos, bien generados ex profeso, o bien recopilados de publicaciones existentes, que se han utilizado para definir las distintas soluciones a emplear en los proyectos:

TÍTULO DOCUMENTO	AUTOR	PROCEDENCIA (*)	AÑO
Guía para la rehabilitación de instalaciones abandonadas de residuos mineros	IGME	RP	2019
Revisión de técnicas y medidas correctoras realizadas para la recuperación ambiental de las instalaciones de residuos mineros	IGME	RP	2017
Interpretación y evaluación del contenido en metales y metaloides de los suelos en las ramblas de la sierra minera de Cartagena-la unión vertientes al mar menor. TT.MM. de Cartagena y de La Unión (Murcia)	Univ. Politécnica de Cartagena (UPCT)	R	2022
Formulación tecnosoles sierra minera de Cartagena	Univ. Santiago de Compostela (USC)	R	2022

TÍTULO DOCUMENTO	AUTOR	PROCEDENCIA (*)	AÑO
Evaluación técnica de las actuaciones de restauración de depósitos de residuos mineros del mar menor	Univ. Politécnica de Madrid (UPM)	R	2022
Evaluación de diferentes métodos de restauración ambiental en balsas de lodos de flotación en la sierra minera Cartagena – La Unión	Univ. de Murcia (UM)	R	2023
Análisis de test aba de muestras de suelo en depósitos mineros, caracterización química y recomendaciones para el tratamiento de suelos mineros	Univ. de Huelva (UH)	R	2023
Revisión de los proyectos de actuación en suelos mineros en la sierra minera de La Unión y Cartagena dentro del MAPMM	Fundación sierra minera	R	2022

Tabla 1. Relación de documentación consultada.

***'®):** Informes o estudios realizados ex profeso para la redacción de los proyectos de restauración ambiental de la sierra de Cartagena - La Unión.

'(RP): Informes o estudios publicados por otros organismos y administraciones.

Problemática existente

A continuación, se enumeran los problemas existentes en el área de actuación y una selección de posibles alternativas para mitigarlos, basadas,

como se ha indicado en los informes y estudios realizados al efecto y en la documentación publicada:

PROBLEMA	ALTERNATIVAS ESTUDIADAS	ESCOGIDA EN PROYECTOS IRMAS	ESCOGIDA EN PROYECTOS RHF
Inestabilidad estructural de los depósitos mineros o imposibilidad de aplicar ciertas técnicas constructivas debido a la topografía, laderas con fuerte erosión y concentraciones de escorrentías con fuertes arrastres de sedimentos.	a. Mantenimiento de la topografía actual	NO	EN SITUACIONES EXCEPCIONALES
	b. Remodelación topográfica, corrección hidrológica + obra civil asociada	SÍ	SÍ
Alta concentración de contaminantes susceptibles de dispersión eólica y por escorrentía. Ausencia de suelo con propiedades edáficas aptas para la generación de un ecosistema funcional.	a. Mantenimiento de las propiedades edáficas actuales	NO	NO
	b. Fitoextracción	NO	NO
	c. Metodología MIPOLARE	NO	NO
	d. Técnicas de bioingeniería	NO	NO
	e. Fitoestabilización	SÍ	SÍ
	f. Tecnosoles o enmiendas de suelo	SÍ	SÍ (solo en lugares con presencia de IRMAs)
	g. Confinamiento de lodos mineros e instalación de barreras impermeables (tratamiento impermeabilizante)	SÍ	NO OBJETO DEL PROYECTO
	h. Reforestación	SÍ	SÍ (solo en lugares con presencia de IRMAs)

Tabla 2. Problemas existentes y posibles alternativas.

Soluciones contempladas para la inestabilidad estructural

En las Instalaciones de Residuos Mineros Abandonados (IRMAs), la inestabilidad de los terrenos responde a una casuística variable como se ha indicado en capítulos previos.

Se diferenciará, para la aplicación de soluciones, entre las plataformas y los taludes de las instalaciones de residuos mineros de mayor entidad (por ejemplo, el depósito Descargador I), y otros depósitos de menor entidad y por tanto más sencillos de plantear (como, por ejemplo, los alrededores de Llano del Beal). Además, se ha de tener en cuenta que en el entorno inmediato a esas instalaciones de residuos mineros se encuentran diferentes áreas afectadas sobre las que también se prevé realizar una remodelación topográfica de la superficie más suave.

Las plataformas de las instalaciones de residuos mineros, por lo general, se encuentran en muy mal estado, presentando rasantes irregulares, deformaciones, hundimientos y otros accidentes que provocan que el agua de lluvia se estanque en su superficie o, por el contrario, debido a las fuertes pendientes se dirija hacia los taludes de forma descontrolada.

Estos condicionantes propician, por un lado, que en temporada de precipitaciones los materiales peligrosos sean transportados aguas abajo desde las zonas de embalsamiento, y, que, por otro lado, se produzca la erosión de los taludes generándose cárcavas y provocando finalmente problemas de desestabilización de la estructura.

Por todo ello, es necesario solventar estos riesgos ejecutando una remodelación a nivel estructural en su conjunto (plataformas, taludes y emplazamientos adyacentes), de esta forma se evitará el transporte de grandes cantidades de residuos mineros hacia las ramblas, ramblizos y barrancos que discurren por la cuenca y desembocan en el Mar Menor.

En los terrenos objeto de **restauración hidrológico-forestal**, existen grandes taludes de origen antrópico y con inestabilidad en las laderas, con importantes procesos erosivos y consiguiente producción de sedimentos. También, se observan procesos erosivos en las llanuras ubicadas aguas abajo

de estos taludes debido a que la mayor parte de estos se encuentran altamente degradados y no disponen de vegetación alguna. Esta situación de deterioro es también asimilable a las llanuras que a menudo se encuentran en las zonas superiores de dichos taludes.

Las alternativas contempladas para solventar los riesgos estructurales del terreno son las siguientes:

a) **Mantenimiento de la topografía actual:** de forma general NO resulta viable, ya que como se ha indicado anteriormente, es necesario evitar que las aguas pluviales permanezcan estancadas en las plataformas de las instalaciones de residuos mineros ya que pueden filtrarse a su interior e incrementar de esta forma su inestabilidad. Igualmente, en el estado topográfico actual, los procesos erosivos están facilitando el transporte de los residuos existentes hacia las ramblas de la cuenca vertiente al Mar Menor.

En el caso de la RHF, esta opción tampoco es adecuada, debido a que los taludes existentes están degradados en parte a la escasa presencia de vegetación, consecuencia de la topografía existente, que no favorece un curso ordenado de las escorrentías que se producen, impidiendo la creación y mantenimiento de suelo. Por lo que resulta imprescindible su adecuación. La opción de mantener la topografía sólo se podrá tomar en consideración en situaciones de imposibilidad de acceso o de muy altas pendientes y/o altura de talud.

b) **Remodelado topográfico del terreno y corrección hidrológica:** supone la adecuación de la superficie de las plataformas y actuar sobre las zonas deterioradas que presentan los taludes y que ponen en riesgo la estabilidad de la estructura. Además, esta solución permite la aplicación posterior de ciertas soluciones constructivas que pretenden actuar sobre los tóxicos y contaminantes presentes en el terreno para neutralizarlos y/o evitar su dispersión.

En el caso de la RHF, incluye una serie de soluciones que son clave para evitar la emisión de sedimentos, tomando especial relevancia la corrección hidrológica con diferentes soluciones de obra civil para frenar la erosión y proteger taludes (diques, albarradas, rastrillos, caballones, cunetas, etc.)

Analizando las características topográficas de las instalaciones de residuos mineros y su entorno, así

como la situación actual de los mismos, se ha optado por seleccionar la alternativa “b”, que incluye un **REMDELADO TOPOGRÁFICO Y CORRECCIÓN HIDROLÓGICA**. Técnicamente, es posible ejecutar este trabajo debido a que se dispone del suficiente volumen de material procedente de los desmontes a ejecutar en las propias instalaciones de residuos mineros, sin necesidad de aportar material de préstamo, por lo tanto, la totalidad de los materiales mineros quedarán dentro de los límites del área de actuación.

De igual forma ocurre con las zonas de restauración hidrológico-forestal, que también requieren del remodelado del terreno para frenar la emisión de sedimentos transportados en la escorrentía.

Los beneficios que se consiguen son:

- Reestructurar la superficie y pendiente de las plataformas y de los taludes.
- Mejorar la estabilidad de las instalaciones de residuos mineros y su entorno a largo plazo.
- Disminuir la erosión superficial del terreno, apostando por la mejora y conservación de suelos.
- Posibilitar pendientes para la implantación de ciertas técnicas constructivas como los tecnosuelos o enmiendas correctoras, además de la reforestación.
- Al disminuirse los graves procesos erosivos existentes se favorece la regeneración natural del terreno promoviéndose la implantación de la vegetación y el aumento de la biodiversidad.

Soluciones contempladas para la alta concentración de contaminantes susceptibles de dispersión eólica y por escorrentía, y ausencia de suelo con propiedades edáficas aptas para la generación de un ecosistema funcional

La actividad minera desarrollada durante años en la zona produjo un importante deterioro de las propiedades edáficas de los suelos. De los resultados de las analíticas realizadas se pueden obtener conclusiones como que el bajo pH del sustrato, la alta salinidad y la elevada concentración de metales pesados favorecen la movilidad de metales y metaloides existentes. Estas características de los suelos han imposibilitado el establecimiento de cualquier tipo de vegetación en grandes extensiones de superficie de la Sierra, con los consiguientes problemas de erosión y de suelos aún más pobres.

Las instalaciones de residuos mineros abandonados (IRMAs) requieren tratamientos específicos orientados a reducir o eliminar el potencial contaminante de los residuos, y a reducir o eliminar su capacidad de dispersión, ya sea eólica o por escorrentía, con el fin de evitar procesos contaminantes sobre la atmósfera, los recursos hídricos y del suelo, que afectarían tanto al entorno natural como a las poblaciones cercanas.

Para ello, existen diversas técnicas cuya elección depende de:

- propiedades edáficas existentes (ph, conductividad, textura...)
- concentración de contaminantes,
- tipo de materiales,
- relación entre el coste y el beneficio,
- características del entorno (cercanía a núcleos de población o a cauces)

Para cada **Conjunto de actuación** se han seleccionado diferentes tratamientos en cada una de las IRMAs que los componen, siguiendo una metodología de caso por caso con diferentes sistemas de sellado en función de las características de cada instalación de residuos y de las zonas de influencia o entornos inherentes a estos. Dicho sellado se complementa con una recuperación del suelo y de la cobertura vegetal mediante fitoestabilización y plantaciones.

Igualmente, para las diferentes zonas de **Restauración hidrológico-forestal (RHF)** se busca una neutralización de los contaminantes presentes en el suelo, y una posterior regeneración de la cubierta vegetal que contribuya a controlar la producción de sedimentos, disminuya la escorrentía y aumente la capacidad de infiltración de los suelos de la Sierra Minera, además de potenciar la biodiversidad.

Las técnicas y especies vegetales para usar se eligen según las pendientes y el estado de degradación de suelos y comunidades vegetales:

- En situaciones de total degradación, se pretende implementar una cubierta vegetal completa mediante el uso de especies pioneras, identificadas durante los trabajos de campo realizados.
- En situaciones donde haya vegetación, el objetivo será aumentar la biodiversidad de la zona con especies próximas al ecosistema clímax de la zona y/o incluir especies beneficiosas para la fauna.

Las metodologías contempladas inicialmente fueron:

- a) **Mantenimiento de las propiedades edáficas actuales:** Esta alternativa **no resulta viable**, ya que la degradación existente imposibilita el establecimiento de cualquier tipo de vegetación debido a que el suelo ha perdido toda su funcionalidad. Es preciso en primer lugar restaurar los suelos para aumentar la cubierta vegetal y así disminuir la escorrentía y la erosión eólica. Además de conseguir aumentar la infiltración e impedir la erosión y el transporte de sedimentos y residuos existentes hacia las ramblas vertientes al Mar Menor.
- b) **Fitoextracción:** consiste en disminuir la concentración de metales contaminantes existentes en el terreno mediante el cultivo de plantas selectivas, las cuales realizan la absorción de contaminantes del suelo por sus raíces y su transporte a las partes aéreas o cualquier parte que sea recolectable. **Debido a la alta concentración de metales, la alta salinidad y el bajo PH, esta alternativa NO se ha considerado viable** para dar respuesta a los objetivos de restauración que se han propuesto alcanzar, ya que, pasado un tiempo, las plantaciones absorben estos restos tóxicos y, por tanto, deben ser consideradas como residuos potencialmente peligrosos, con el consiguiente perjuicio para la fauna. Del mismo modo, esta solución puede disminuir la concentración de contaminantes pero no impedir la dispersión de los mismos en el corto y medio plazo.
- c) **Metodología "MIPOLARE":** se trata de un proyecto europeo financiado por LIFE+, un instrumento financiero europeo para el medio ambiente. Se basa en hacer uso del carbonato cálcico para crear barreras físicas contra los metales y que estos no afecten al crecimiento del sistema radicular de las plantas. Por otra parte, se aportan enmiendas al suelo a modo de estiércoles sólidos y líquidos (purines) para mejorar las propiedades del suelo y permitir un correcto desarrollo de la vegetación. **Debido a la alta concentración de metales, la alta salinidad y el bajo PH, esta alternativa NO se ha considerado viable para su aplicación de forma única.**
- d) **Obras de bioingeniería:** se trata de una disciplina técnica en la que se utilizan plantas vivas como elementos de construcción, de tal modo que al desarrollarse con el suelo contribuyen de manera esencial a su estabilidad y a evitar toda forma de erosión. Existen diferentes formas de llevarlas a cabo, las más usadas son la técnica del estaquillado, con el fin de que enraícen y

se desarrollen en una planta completa, y el uso de fajinas vivas, el cual comporta la confección de manojos atados de ramas vivas cortadas de plantas leñosas, formando estructuras cilíndricas alargadas.

Estas medidas se desestiman debido a las condiciones climáticas de la zona de trabajo, principalmente, a los largos periodos estivales con ausencia de precipitaciones.

- e) **Fitoestabilización:** se trata de una técnica de bajo coste, si la comparamos con todas las descritas anteriormente, en la que se utilizan plantas para formar una cobertura vegetal permanente, con el objetivo de minimizar la movilidad y disponibilidad de los contaminantes existentes en el suelo, además de reducir la erosión, la escorrentía superficial y evitar la producción de contaminantes secundarios. Principalmente se basa en las interacciones entre las plantas, el suelo y los microorganismos.
- f) **Empleo de Tecnosoles y enmiendas:** se trata de una alternativa para la recuperación de suelos degradados, como es el caso de la actividad minera. El uso de este tipo de sustratos mejora las propiedades físico-químicas del suelo, controla los procesos de degradación ambiental e incluso permite reconstruir el paisaje dañado. Con el empleo de Tecnosoles se consigue inmovilizar los elementos metálicos (Cd, Cu, Fe, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn, Mn) y metaloides (As), potencialmente tóxicos. Esta estabilización "in-situ", se puede complementar con la revegetación del terreno que evite la erosión hídrica y eólica.
- g) **Confinamiento de lodos mineros e instalación de barreras impermeables (tratamiento impermeabilizante):** esta alternativa presenta mayor complejidad que las descritas anteriormente, debido a que hace uso de una secuencia de capas que garantizan la impermeabilización y encapsulado del conjunto de los residuos mineros y, mediante una red de drenes, eliminan las posibles infiltraciones del agua de lluvia. Además, este tratamiento se puede complementar con el aporte de tierra vegetal y su posterior revegetación sin necesidad de llevar a cabo enmiendas.
- h) **Restauración pasiva:** El objetivo de esta técnica es preservar y regenerar los ecosistemas que tienen un nivel de degradación menor. Estas áreas son zonas con vegetación establecida como pastizales, especies arbustivas o de arbolado, etc. La restauración pasiva consiste en tratamientos silvícolas (si aplica), completándose con la eliminación de especies exóticas invasoras, donde se mantiene el arbolado y la vegetación presente, estas áreas o zonas actualmente funcionan como sumideros de carbono.

- i) **Reforestación:** consiste esta opción en la plantación de especies arbóreas, herbáceas y arbustivas, incrementándose la densidad de las masas vegetales, evitando la desertificación y la deforestación. Se contemplan varias técnicas que se desarrollan en los capítulos destinados a cada proyecto, como el ahoyado manual o mecanizado para árboles y arbustos y la siembra manual e hidrosiembra para herbáceas. En este tipo de actuaciones se incluyen también las eliminaciones de especies exóticas invasoras.

Entre las alternativas anteriores, las empleadas en los **proyectos de IRMAs** han sido:

- Tecnosoles (concretamente la aplicación de tratamiento encalante)
- Confinamiento de lodos mineros mediante la instalación de barreras impermeables (tratamiento impermeabilizante)
- Fitoestabilización
- Reforestación

Se han seleccionado estas alternativas debido a que mediante las mismas se consigue impedir o reducir

la presencia de los residuos en las capas más superficiales del terreno, quedando la mayor concentración de los mismos en un espesor controlado y definido, reduciendo así la contaminación por escorrentía y eólica al entorno inmediato.

El empleo de cada uno de estos tratamientos en los diferentes emplazamientos e instalaciones de residuos mineros depende de las condiciones estructurales del terreno, de los resultados de las analíticas foliares, agua y suelo realizadas y de la cercanía a los núcleos de población, principalmente.

Por otro lado, en los proyectos de **restauración hidrológico-forestal** se utilizan:

- Fitoestabilización
- Reforestación mediante ahoyados, siembra manual e hidrosiembras, y eliminación de especies exóticas invasoras
- Restauración pasiva
- Tecnosoles (concretamente la aplicación de tratamiento encalante)

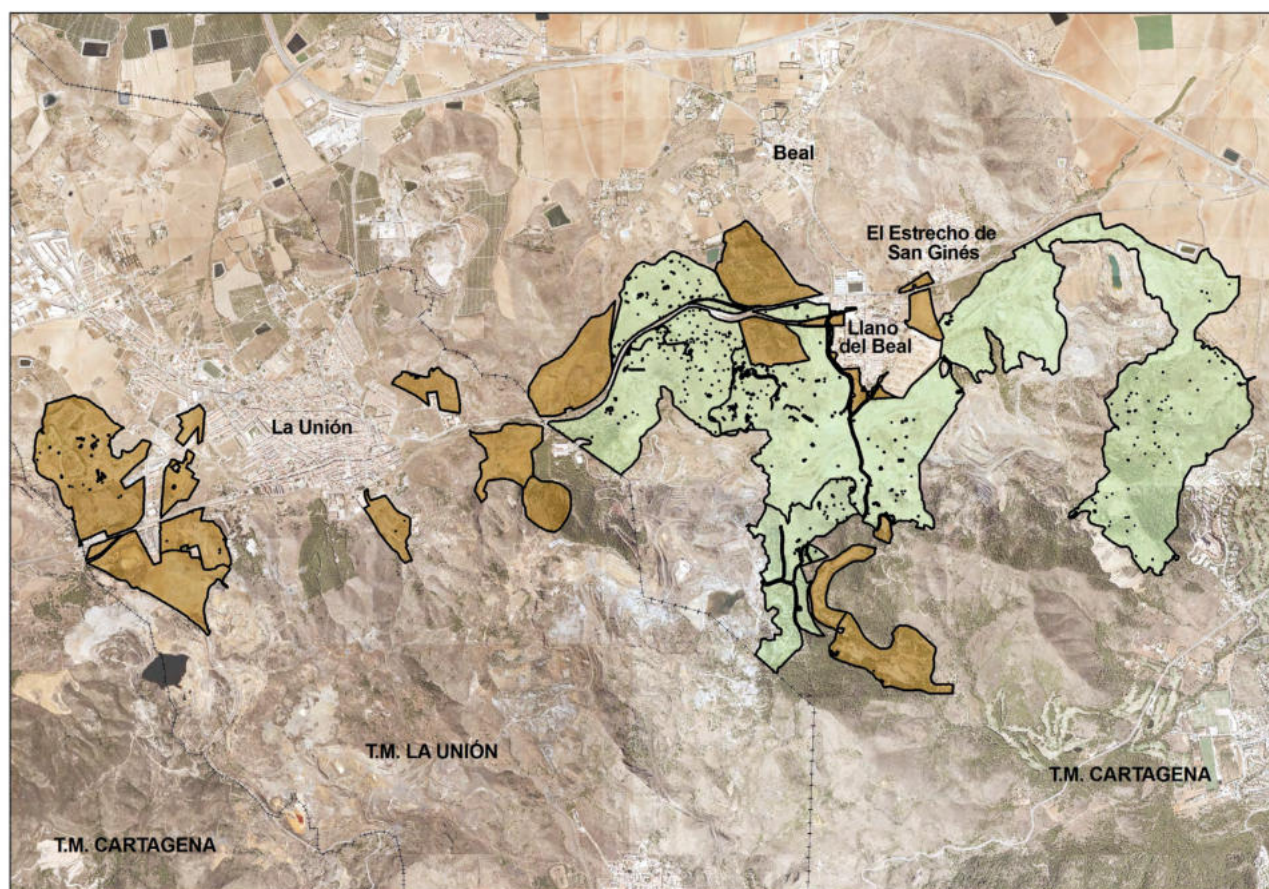


Figura 2. Ámbito de los proyectos de la línea 2.3. Proyectos de remediación ambiental de emplazamientos mineros o IRMAs (en marrón), y zonas de restauración hidrológico-forestal (en verde).

Bibliografía

Arranz González, J.C., Rodríguez Gómez, V., Rodríguez Pacheco, R. (2019). GUÍA PARA LA REHABILITACIÓN DE INSTALACIONES ABANDONADAS DE RESIDUOS MINEROS.

Instituto Geológico y Minero de España. (2017). *Informe sobre la restauración de espacios mineros: Retos y avances en España*. Instituto Geológico y Minero de España. <https://www.igme.es/restauracion-minera>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). *Plan nacional para la restauración de espacios degradados por la minería en España*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/restauracion-mineria>

3.2. Aplicación de soluciones a las instalaciones de residuos mineros abandonados (IRMAs): grandes presas y terrenos contaminados

AUTORES: Jaime Talavera Sánchez, Juan Manuel Domingo, Nadia García Ruiz. Grupo TRAGSA. Delegación Murcia.

3.2.1. Las grandes presas y los terrenos contaminados de la sierra minera

En el capítulo anterior se presentó el catálogo general de soluciones y se definieron los tipos de intervención para los proyectos de IRMAs y de restauración hidrológico-forestal.

Estas soluciones se prevén aplicar en cada uno de los conjuntos mineros y áreas de restauración hidrológica en los que dividen las actuaciones:

CONJUNTOS - IRMAS	NOMBRE	SUPERFICIE DE RESTAURACIÓN (HA)*
Conjunto 1	Núcleo urbano Llano del Beal	11,04
Conjunto 2	Colegio de La Unión	8,13*
Conjunto 3	Benzales	8,82*
Conjunto 4	Brunita	26,16
Conjunto 5	Descargador	37,52
Conjunto 6	Cuesta de Las Lajas	8,5*
Conjunto 7	Marqués de Péjar	29,26*
Conjunto 8	Peña del Águila	35,57*
Conjunto 9	Torrecica	46,84*

Tabla 1. Superficie de restauración de los distintos conjuntos.

*: Superficies inicialmente indicadas en el proyecto sometido a estudio de impacto ambiental).

Este capítulo se centra en cómo aplicar las soluciones a las “grandes presas”, que constituyen los casos más complejos de abordar, y también cómo tratar los terrenos contaminados que rodean en la mayoría de ocasiones a estas presas de lodos mineros.

Como se ha expuesto en capítulos anteriores, las presas son estructuras resultantes de la acumulación en el terreno de los materiales derivados de los procesos de metalurgia extractiva de las menas

metálicas. Debido a la forma en que se depositaba el lodo acuoso sobrante, éste se contenía mediante un sistema de tablestacado que iba recreciéndose conformando de esta manera la estructura del vaso, concentrándose en el exterior del mismo las partículas de mayor tamaño y acumulándose la fracción más fina y el agua sobrante en el interior del mismo.

Para la determinación de las instalaciones sobre las que actuar se ha tomado como referencia en pri-

mer lugar el inventario nacional de depósitos de lodos mineros realizado por el Instituto Geológico y minero de España (IGME), localizando aquellos depósitos situados en la cuenca vertiente del Mar Menor, objeto del presente Marco de Actuaciones Prioritarias. Una vez localizados se ha tenido en consideración para su selección el Plan de Recuperación Ambiental de Suelos Afectados por la Minería (PRASAM), especialmente en aquellos depósitos cercanos a ramblas y/o con riesgos estructurales. Igualmente, se han considerado las solicitudes de actuación en otros pequeños depósitos dispersos, sugeridos por asociaciones de vecinos durante las jornadas participativas llevadas a cabo en La Unión y el Llano del Beal, previo al inicio de la redacción de los proyectos.

ZONAS RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO FORESTAL	ZONA ACTUACIÓN
Zona 1 - Santa Lucía	92,78
Zona 2 - Ocasión	72,54
Zona 3 - El Porvenir	44,01
Zona 4 - La Reservada	48,05
Zona 5 - La Rosa	39,29
Zona 6 - Los Blancos	133,63
Total	430,30

Tabla 2. Superficie de restauración de las distintas zonas.

Dentro de los 9 conjuntos de IRMAs, los siguientes contienen presas de un volumen importante:

- Conjunto 5: Descargador I y II (370.000 m³ y 200.000 m³ respectivamente)
- Conjunto 4: Brunita (850.000 m³)
- Conjunto 8: Peña del Águila y Pantano de la Rosa (150.000 m³ y 840.000 m³ respectivamente)
- Conjunto 6: Cuesta de las Lajas (320.000 m³)

Estas presas, como se indicó en capítulos anteriores, cuentan con importantes riesgos geotécnicos-estructurales y requieren de las siguientes actuaciones:

- a) **Remodelado topográfico de pendientes y taludes.** La reducción de pendientes en los taludes de las presas es clave para disminuir los riesgos de deslizamiento y asegurar la correcta

ejecución y funcionamiento del resto de capas de la solución, así como el replanteo de las zonas llanas o plataformas donde actualmente se acumula el agua generando problemas de filtraciones. La reducción de pendientes en taludes también permitirá la aplicación de soluciones de impermeabilización para el sellado de los residuos.

- b) **Obra civil auxiliar: infraestructuras de contención** (muros de gaviones, escolleras, estabilización mediante columna de grava, etc.) y sistemas de drenaje.
- c) **Aplicación de tecnosuelos o enmiendas de suelo:** concretamente para los depósitos de la Sierra Minera, se ha optado por aplicar un **tratamiento encalante o filler calizo** con el objetivo de neutralizar la acidez existente y minimizar la movilidad de los contaminantes presentes en el terreno. La dosificación del material tipo encalante a aportar se diseña de acuerdo con los resultados de las analíticas del material existente en el depósito.
- d) **Confinamiento de lodos mineros e instalación de barreras impermeables (tratamiento impermeabilizante).**

Por otro lado, y además de las presas, alrededor de las IRMAs existen zonas que presentan altos niveles de metales y metaloides, así como otros compuestos, pero no son estrictamente presas de lodos mineros, sino que se trata de terrenos contaminados que no presentan los mismos riesgos ni estructurales, ni de contaminación de escorrentías por lixiviación. En estos casos, las actuaciones a realizar son a), b) y c), prescindiendo —casi totalmente— del sellado mediante solución impermeable.

Este es el caso de los siguientes conjuntos mineros:

- Conjunto 1: Llano del Beal
- Conjunto 2: Colegio
- Conjunto 3: Benzales
- Conjunto 9: Torrecica
- Conjunto 7: Marqués de Péjar

En definitiva, las soluciones técnicas aplicadas son variaciones de las anteriormente expuestas, que se aplican caso por caso según las características de las IRMAs y suelos presentes en cada conjunto, mediante la realización de analíticas de suelo observando los valores de: pH, conductividad eléctrica, humedad, granulometría, presencia de metales y metaloides y potencial de generación de drenaje ácido de roca, entre otros.

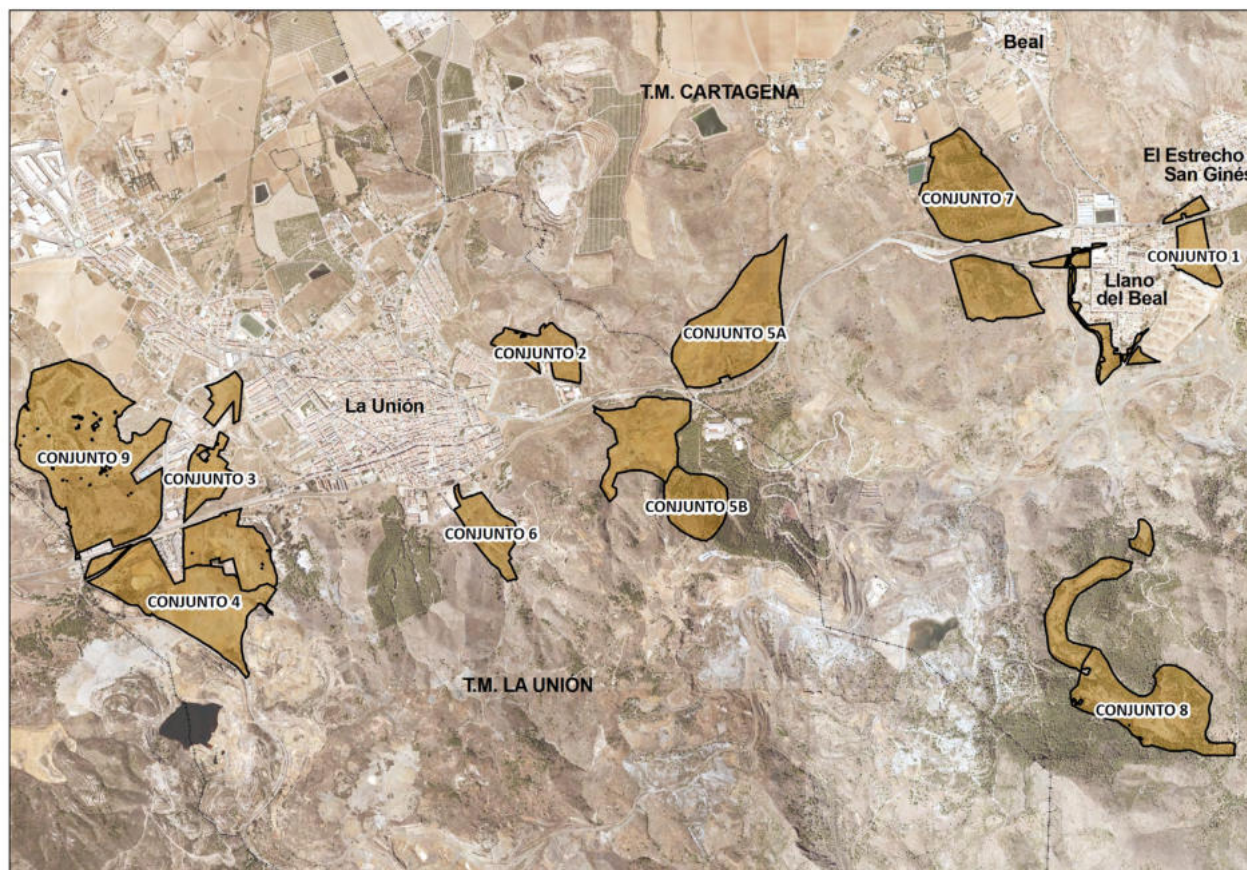


Figura 1. Situación de los conjuntos.

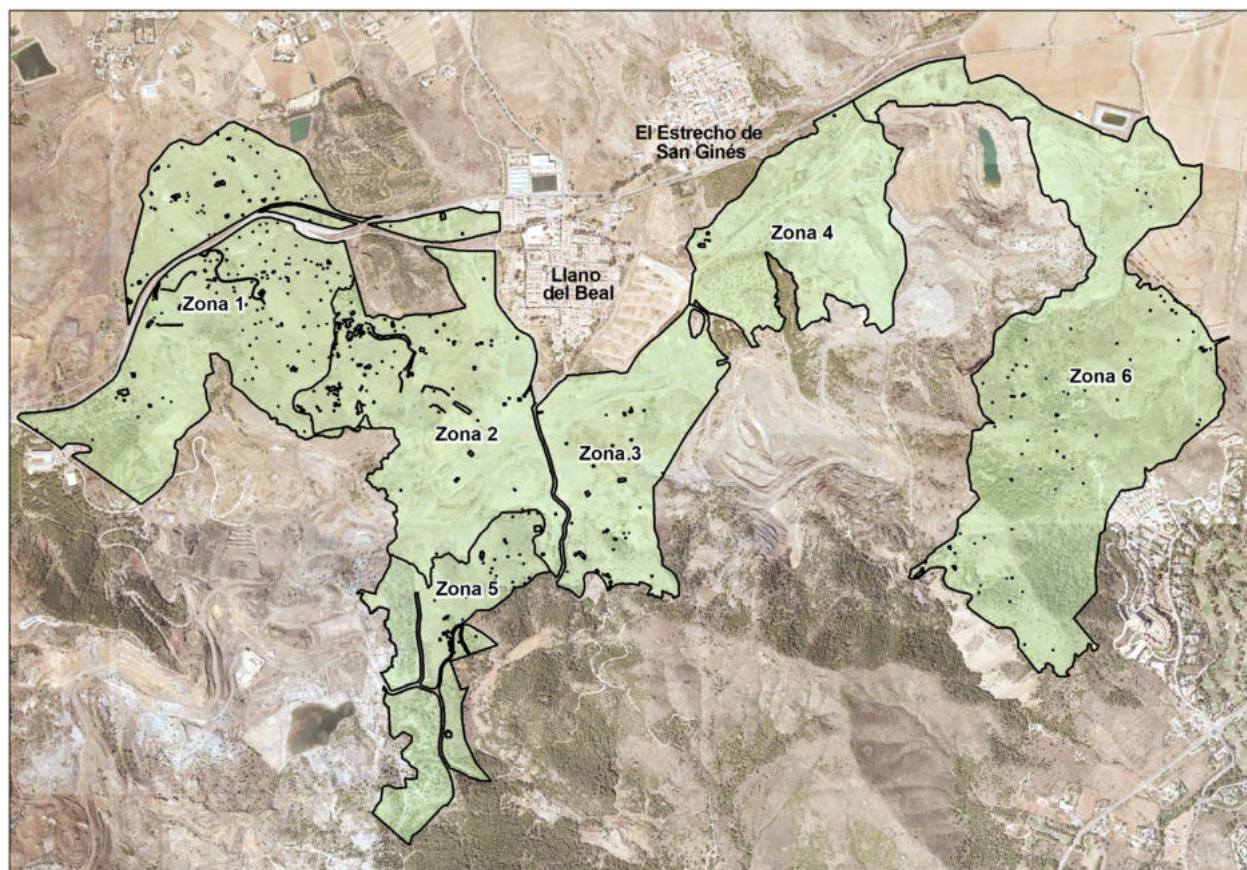


Figura 2. Situación de las zonas.

Remodelado topográfico de pendientes y taludes y obra civil auxiliar

La situación actual de la mayoría de los depósitos es la de taludes continuos, de fuerte pendiente y sin infraestructuras transversales de contención ni adecuados drenajes, que provocan cárcavas y problemas de estabilidad en numerosos puntos, presentando relaciones de inclinación hasta 1H:1V.

En la mayoría de los depósitos se prevé un remodelado topográfico integral para mayor estabilidad estructural, mediante el tendido de **taludes** existentes a relaciones entre 3H:1V a 7H:1V. Esta relación es también la que permitirá la aplicación de soluciones técnicas como la impermeabilización mediante arcillas, expuesta en el siguiente punto.

Entre los tramos de taludes, se diseñan **bermas** de anchura variable, con pendiente hacia el perímetro de los depósitos de manera que se asegure la evacuación de la escorrentía. Estas bermas dispondrán de peralte transversal con pendiente negativa del 2% hacia el interior del depósito y contarán con cunetas triangulares de hormigón. Estas bermas transversales estarán complementadas con una berma perimetral, que a su vez contará con **cunetas perimetrales** de sección trapezoidal en la base de los taludes más inferiores como punto final de recogida de toda la escorrentía.

A su vez, como protección del pie de los taludes, se prevé la colocación de tramos de piel de **escollera** con el fin de evitar erosiones que podrían provocar las escorrentías superficiales, formados por roca mayor de 60 cm, en una longitud de 3 metros, a lo largo de los distintos taludes que conforman el depósito.

En otros puntos de las obras, se prevé la construcción de **muros de gaviones**, cuya función principal es asegurar el correcto drenaje de las aguas de escorrentía hacia las cunetas, por ello su trazado se ejecuta paralelo al de las cunetas proyectadas. Sin embargo, se hace preciso su uso en otros puntos de la obra, como es en determinados tramos de cauces de ramblas o en la base de taludes, para evitar posibles desplomes de tierras, arrastres y aterramientos. Los gaviones se elaborarán mediante cerco de malla metálica, cosido y atirantado con alambre galvanizado, con piedra recogida "in situ" de altura inferior o igual a 3 m.

En algunos puntos de las obras, los tratamientos de cauces consisten en acabados de encachado de piedra protegidos con muros de gaviones ambas márgenes.

Confinamiento de lodos mineros e instalación de barreras impermeables (tratamiento impermeabilizante) "T1"

La presencia de gran cantidad de metaloides en las balsas de lodos, precisa de un sistema de sellado conformado por capas cuya labor consiste en el confinamiento de los materiales tóxicos y la dotación de sistemas de seguridad ante las posibles escorrentías, tanto superficiales como subsuperficiales e interiores, mediante drenajes.

Se trata de la ejecución de un sellado a base de la aplicación de diferentes capas de materiales como arcilla, gravas y tierra vegetal, así como de la instalación de láminas de polietileno (PEAD) y geotextil, cuya acción conjunta consiguen aislar los residuos del entorno manteniendo impermeable el conjunto, e impidiendo de esta forma la movilización de los residuos confinados y su transporte vía escorrentía o eólica.

Esta solución de sellado se identifica con el código "**T1**".

Descripción

La solución está compuesta por una lámina de geotextil que realiza la función de separación con los residuos existentes (gramaje 181-200 gr/cm²), sobre esta, una de una capa de arcilla compactada de 40 cm de grosor, seguidamente se extenderá una lámina de geotextil de protección (gramaje 181-200 gr/cm²), una lámina de polietileno de alta densidad PEAD de 1.5 mm de espesor, (liso o texturizado según localización). Sobre la lámina de PEAD se dispondrá otra lámina de geotextil de protección, es esta ocasión de un gramaje superior (326-385 g/cm²). Seguidamente, se aportará una capa de grava, de diámetro 20-40 y grosor 20 cm, sobre la que se colocará otra lámina de geotextil de separación (gramaje 181-200 gr/cm²), y finalmente se extenderá una capa de tierra vegetal, de grosor 40 cm, sobre la que se plantarán especies vegetales típicas (herbáceas y arbustivas).

En las zonas de plataformas, en el interior de la capa de grava, se instalará un **sistema de drenaje**, compuesto por drenes de PVC de doble pared, Ø100mm y colectores de recogida de los drenajes internos de Ø160mm. Estas redes de drenaje quedarán conectadas con el sistema de drenaje superficial (cunetas perimetrales) proyectado para la recogida de las aguas superficiales, a través de embocaduras de hormigón en masa del mismo tipo que el utilizado para dichas cunetas.

Drenaje de lixiviados

Antes de la colocación del sistema de sellado, se instalará una red de conducciones de PVC corrugado, con relleno de gravas de tamaño 10-20 mm y con cubrición de lámina de geotextil de gramaje 181-200 gr/cm², destinada a la recogida de los posibles **lixiviados** que puedan emanar del interior del depósito, de forma que se creará una **red separativa respecto a la red de drenaje superficial** (cunetas y conducciones del interior de la capa de gravas), que permitirá la identificación de la procedencia de los posibles vertidos. Esta red estará provista de **arquetas de registro** en las que se ubicarán válvulas de compuerta para la correcta identificación de la zona en la que se producirían los posibles lixiviados.

Diferencias del sistema de sellado T1 en plataformas y taludes

Este sistema de sellado está compuesto por las mismas capas tanto en las zonas de plataforma de los depósitos como en las zonas de taludes, diferenciándose únicamente por la existencia del sistema de drenaje interno indicado anteriormente y que se instala en las plataformas y la instalación de lámina de texturizada o rugosa en aquellas zonas (taludes) de mayor pendiente para evitar posibles deslizamientos. Por tanto, la sección tipo del tratamiento (T1) en taludes será como se muestra en la siguiente imagen:

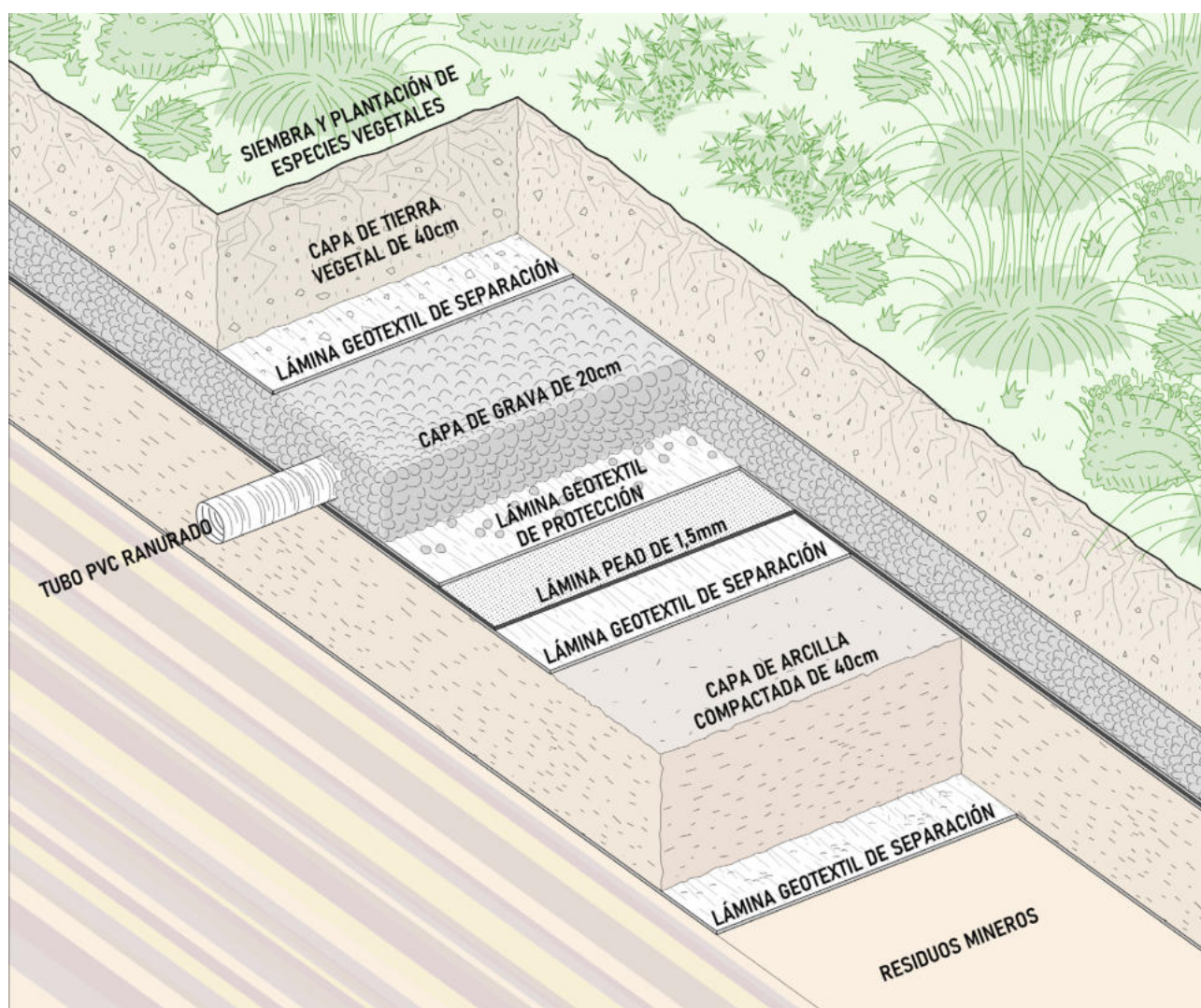


Figura 3. Sección de tratamiento impermeabilizante (T1) en plataformas.

Espesor de la capa de arcilla

Para obtener la impermeabilidad deseada mediante la capa de arcillas a emplear en estos sellados, se debe-

rá de utilizar un material impermeable. Tomando como base el Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, la capa mineral impermeable en el pre-

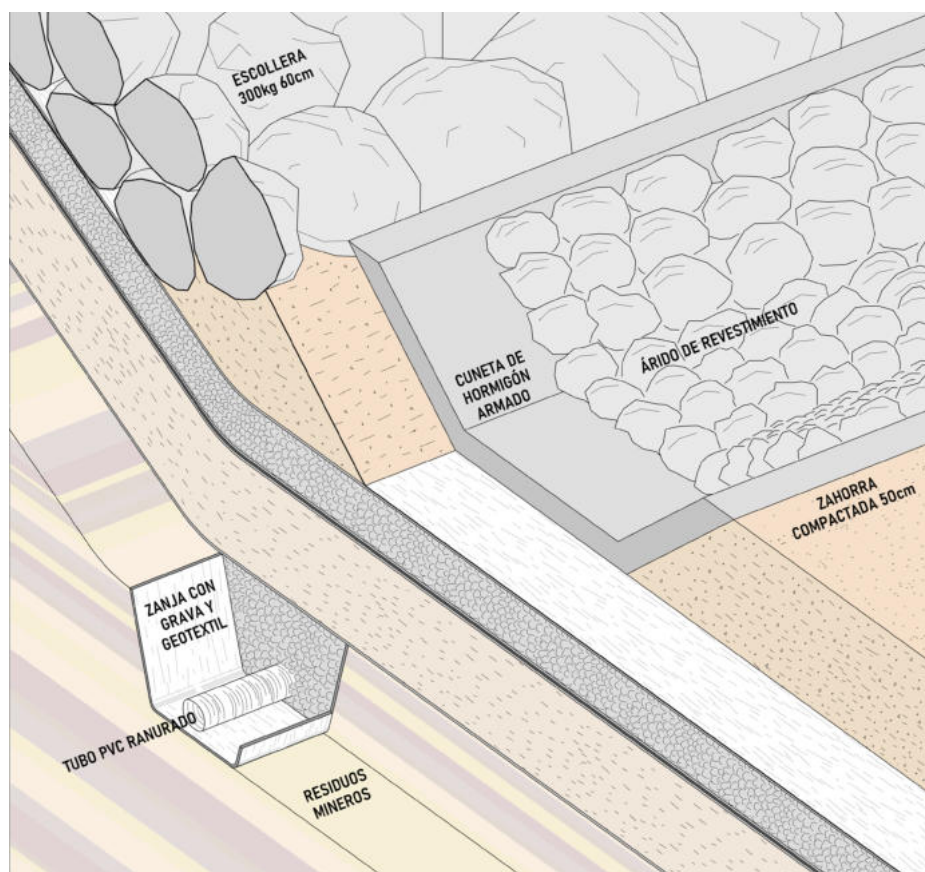


Figura 5. Detalle de construcción de cuneta impermeabilizada en tratamiento T1.

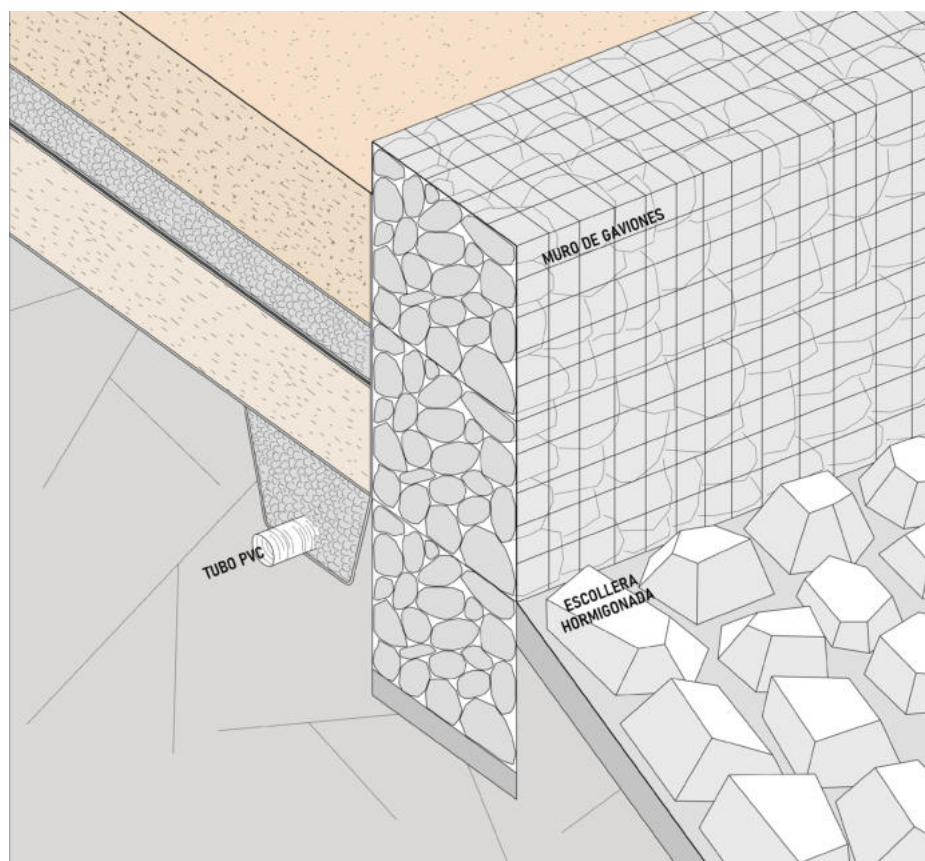


Figura 6. Detalle del tratamiento T1, encuentro con zonas de cauce (gavión y escollera hormigonada) y drenajes internos.

Tratamiento con tecnosuelos o material encalante "T2"

Los tecnosuelos son suelos artificiales compuestos por materias primas cuya función es interactuar con el sustrato existente en el medio, para su mejora físico-química, inmovilizando los contaminantes existentes en el sustrato donde se aplican. Para ello se compone una mezcla específica de productos y subproductos como estiércoles y digestatos, biomasa, compost, cenizas de combustión de biomasa, pumitas, arcillas, suelos rojos y serrines de rocas calcáreas, mármoles, pórfidos o rocas básicas. Estos materiales se seleccionan y mezclan en distintas proporciones en función de los datos físico-químicos del suelo donde se aplicarán.

Estas enmiendas o adiciones al suelo permiten el acondicionamiento de espacios degradados a partir de la combinación adecuada de los elementos que lo componen, permitiendo albergar una cobertura vegetal, sin perder su estructura y sin tener incidencias negativas sobre el medio ambiente.

Tras la realización de las analíticas de suelo, se ha diseñado una solución compuesta de material encalante, con el fin de corregir la acidez del terreno y minimizar la liberación de los metales presentes al medio.

Además del aporte de material encalante se crea, dentro de este sistema, una barrera física mediante el empleo de gravas para impedir el ascenso por capilaridad de las sales existentes. Este tratamiento se aplicará en las inmediaciones de los depósitos principales, es decir, en aquellas zonas que no se han catalogado como depósitos de lodos, sino que son superficies en las que se han producido arrastres y por tanto contaminación procedentes de estos depósitos anexos.

En estas zonas la cantidad de residuos acumulados es mucho menor que en los depósitos existentes, que son grandes concentraciones de residuos, de esta forma, las soluciones adoptadas se ajustan al potencial contaminante de las distintas zonas de actuación.

Descripción

La disposición de capas para esta alternativa denominada T2, está conformada por la adición, en los primeros 40 cm de suelo contaminado de carbonato cálcico (filler calizo). La dosificación de carbo-

nato cálcico a aportar se ha obtenido mediante la realización de test ABA, que permiten obtener el valor de generación de drenaje ácido de roca de la zona a tratar, determinándose en 40 Kg/m² dicha dosificación. Esta cantidad se aplicará sobre los primeros 40 cm del suelo existente mezclándolo con el mismo mediante medios mecánicos.

Seguidamente se extenderá una lámina de geotextil de separación de gramaje 181-200 gr/cm², sobre la que se extenderá una capa de gravas (tamaño 20-40mm) de espesor 20 cm que es la impedirá el ascenso de las sales por capilaridad, prosiguiendo con otra lámina de geotextil de separación, de gramaje 181-200 gr/cm² que protege a la grava de su colmatación por el arrastre de finos de la capa superior de tierra vegetal.

Finalmente, como se indicaba, se cubrirá la superficie con una capa de tierra vegetal de espesor 40 cm, que permitirá la plantación de especies herbáceas y arbustivas.

La disposición de capas de tratamiento del tipo T2 será similar en plataformas como en taludes, al no contemplar un sistema de drenaje interno, dado que no resulta necesario desaguar las posibles filtraciones de la superficie de tierra vegetal.

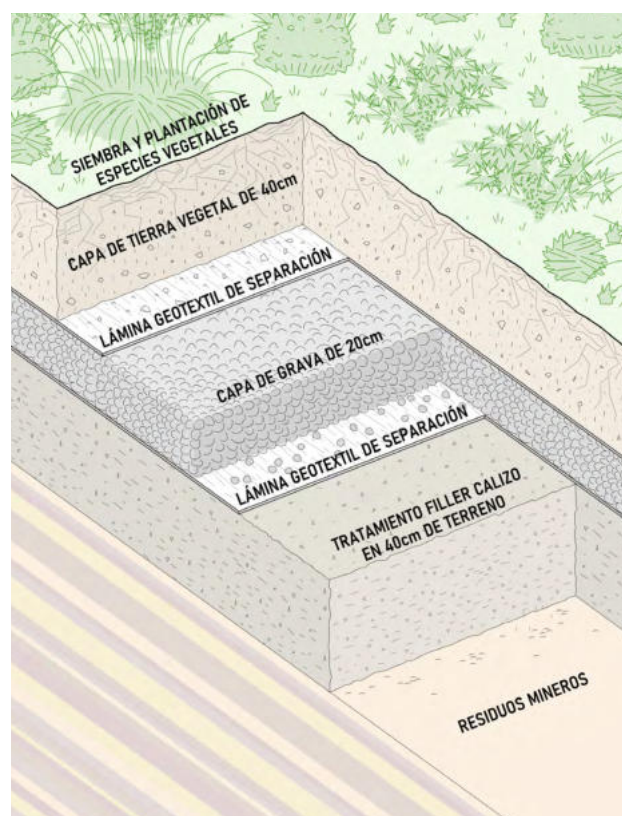


Figura 7. Sección de tratamiento tipo encalante (T2) en plataformas.

Determinación del material encalante

Para la determinación de la cantidad de material encalante a aportar en la solución adoptada para la neutralización del potencial ácido, ha de obtenerse en primer lugar el valor de generación de drenaje ácido de roca, mediante la realización de Test ABA (Acid-Base Accounting).

Este tipo de ensayos geoquímicos es uno de los ensayos más utilizados como elemento predictor de la capacidad de los compuestos existentes en una muestra para generar acidez.

En base a los resultados obtenidos se establecen tanto el potencial de generación de ácido del suelo (PA), como el potencial de neutralización (PN). Finalmente, en función de ambos, PA y PN, puede determinarse el **potencial neto de neutralización (PNN)**.

Según los test realizados hasta ahora en los depósitos, se han encontrado tres casos principales:

- **Suelos que presentan valores de Potencial Neto de Neutralización (PNN) muy positivos (> +40).** Se trata de muestras con abundante presencia de fragmentos calcáreos y que no presentan aportes de residuos mineros. Estos suelos no presentan ningún riesgo de contaminación ambiental, por lo que no sería necesario aplicar ninguna medida correctora.
- **Suelos que presentan valores de PNN muy negativos (< -40).** Se trata de muestras que poseen una contribución importante de residuos mineros ricos en sulfatos de tipo jarosita y oxi-hidróxidos de hierro. Para neutralizar la acidez y reducir la movilidad de los contaminantes presentes en estos suelos es necesario aplicar una enmienda alcalina.
- **Suelos con valores de PNN entre +40 y -40.** En este caso estamos en la zona de incertidumbre o muy próximos a esta, por lo que se aconseja también aplicar una enmienda alcalina.

Una vez conocidas las características de los suelos, se procedió a la selección de una muestra representativa de cada uno de los tres grupos mencionados en el apartado anterior para un estudio más detallado, junto con una selección de materiales que potencialmente se podrían utilizar como agentes encalantes para corregir la acidez y la liberación de metales en los suelos con una notable contribución de residuos procedentes de las actividades mineras.

Como posibles agentes encalantes se seleccionaron:

- 2 tipos de cenizas procedentes de la combustión de biomasa (BFM – Filtro de Masa y BFH – Fondo de Horno)
- 2 tipos de residuos de aserrado de mármol (Filler) ambos con una riqueza superior al 90% de carbonato cálcico.

Los valores de pH obtenidos al aportar filler de mármol en los distintos tipos de suelo producen la neutralización de la acidez del mismo y la reducción de la movilidad de los metales existentes.

Como conclusión, y debido a su alto potencial neto de neutralización, además de su clasificación como material inerte o no peligroso, se deduce que el filler de mármol es el idóneo para su uso como material encalante en todos los casos.

Dimensionado del material encalante

Para el cálculo de la cantidad de material encalante se ha considerado una densidad del suelo para los primeros 20 cm de $1,2 \text{ Tn/m}^3$, expresándose los resultados en forma de Kilogramos de material encalante a adicionar, seleccionado el filler procedente de la industria del mármol para aportar la riqueza de CaCO_3 necesaria que habría que añadir por hectárea de suelo contaminado ($\text{Kg CaCO}_3/\text{ha}$), en función del valor de potencial neto de neutralización (PNN) de dicho suelo.

Según las muestras de suelo para cada conjunto, se obtienen diferentes escenarios. Por ejemplo, en el Conjunto 4-Brunita, son tres: suelo contaminado, suelos no contaminado y zonas de incertidumbre.

Dado que la enmienda seleccionada se trata de un material inerte y con alta riqueza en potencial neto de neutralización, se ha estimado oportuno una aportación homogénea de la dosificación del material encalante (filler de mármol) en todos los depósitos de residuos de cada conjunto minero, por facilitar la ejecución en obra.

Ejemplo: Conjunto 4 Brunita. En base a los resultados obtenidos de los test ABA, se determina como máximo valor en las zonas a tratar con material encalante la adición de $51,45 \text{ Kg (CaCO}_3/\text{Tn suelo)}$ para un suelo de densidad $1,2 \text{ Tn/m}^3$, y teniendo en cuenta que la densidad aparente del suelo existente en los depósitos posee una densidad media de $1,65 \text{ Tn/m}^3$, se selecciona por una parte el aporte de $60 \text{ Kg CaCO}_3/\text{Tn suelo}$, y se ajusta a la densidad aparente del suelo exis-

tente ($1,65 \text{ Tn/m}^3$), resultando un aporte de 200 Tn/ha de filler, esto es, 20 kg/m^2 por cada 20 cm de suelo tratado, y por tanto **$40 \text{ kg de filler calizo/m}^2$ por cada 40 cm de suelo tratado, que es el espesor de tratamiento diseñado.**

Este material se adicionará en la dosificación indicada mezclándolo con el material existente en el depósito para el correcto desarrollo de su función neutralizante.

La dosificación indicada se ha calculado para su mezcla con los primeros 40 cm de espesor en aquellos depósitos que el terreno lo permita, disminuyendo el aporte del material tipo encalante, hasta un máximo de 20 cm . en aquellas zonas en que la presencia puntual de raíces u otros elementos impida tratar el espesor de diseño inicial.

Espesor de la capa de grava

A continuación, se expone el dimensionamiento de la capa de grava prevista en la solución T2, cuya función específica es la de impedir el ascenso de las sales mélicas existentes en el depósito hasta la superficie.

Para ello se ha realizado el dimensionado de la misma en base al siguiente método de cálculo basado en la fórmula de Hazen:

$$h_c = \frac{c}{e \cdot D_{10}}$$

Siendo:

h_c = Ascenso por capilaridad (mm)

c = Constante de forma de partículas

e = índice de poros

D_{10} = Tamaño efectivo (mm)

El índice de poros se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$e = \frac{D_a}{Y_s \cdot L} - 1$$

Donde:

e = Índice de vacíos

D_a = Densidad absoluta (gr/cm^3)

Y_s = Densidad seca (gr/cm^3)

L = Porcentaje de peso volumétrico (%)

Se ha tomado como referencia los resultados obtenidos del análisis granulométrico de una grava caliza 10/20 de cantera, cuyos datos son los siguientes:

DATOS GRAVAS CALIZAS
CONSTANTE FORMA DE PARTÍCULAS (MM^2)
Material fino (40)
Material grueso (50)
DA DENSIDAD ABSOLUTA (TN/M^3)
0,50
0,60
0,70
0,80
0,90
YS DENSIDAD SECA (TN/M^3) 12% DA
0,44
0,53
0,62
0,70
0,79
L GRADO DE COMPACTACIÓN (%/100)
90
95
98
D10 TAMAÑO EFECTIVO (MM) (SEGÚN GRANULOMETRÍA ENSAYADA)
11,29

Se puede considerar:

$$e = \frac{0,50}{0,44 \cdot 0,98} - 1$$

Por tanto:

$$e = 0,160$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la fórmula de Hazen, se obtiene el ascenso por capilaridad:

$$h_c = \frac{0,50}{0,16 \cdot 11,29}$$

$$h_c = 27,76 \text{ mm}$$

En base al resultado obtenido, la capacidad de ascenso por capilaridad de las posibles sales metálicas que pudieran generarse resulta inferior a 3 cm según los cálculos desarrollados, por lo que el espesor de la capa de grava deberá ser superior a este valor.

Se ha optado, para asegurar el efecto y la operatividad en la ejecución de la capa de grava, por extender una capa de **20 cm de espesor**.

La capa de grava se dispondrá entre dos capas de geotextil de 200 gr/cm² para evitar que las partículas de menor tamaño en las capas inferior y sobretodo superior penetren en la misma por arrastres de infiltración y la colmaten, dando lugar a la pérdida de su efectividad como capa barrera para el ascenso por capilaridad.

Fitoestabilización

Otra de las medidas a utilizar para la remediación ambiental, en concreto en aquellas localizaciones cuya concentración de metales y metaloides es menor, y por tanto no es necesario aplicar los métodos anteriormente descritos de sellado, es el aporte directo de tierra vegetal sobre superficies degradadas por la minería. Este aporte se realizará sobre el terreno original, empobrecido, que no dispone ni de la estructura ni de los nutrientes necesarios para el desarrollo de la vegetación.

Mediante la fitoestabilización se consigue mejorar la estructura del suelo, obteniendo un suelo con mayor capacidad para permitir el flujo de agua y aire, mayor capacidad de amortiguación proporciona nutrientes a las plantas y a los microorganismos del suelo, incrementa la capacidad de intercambio catiónico y disminuye la posibilidad de compactación, lo que permitirá el desarrollo de la vegetación y la restauración ambiental perseguida.

Por último, ya con la superficie regularizada a las pendientes de diseño, que permitan evacuar los excesos de agua de lluvia, se realizará la plantación de las especies escogidas.

En última estancia se ejecutará la fitoestabilización, siendo ésta la última capa de las dos principales soluciones escogidas: T1-tratamiento impermeabilizante, y T2- tratamiento encalante.

Dimensionado de la capa de tierra vegetal

Como última capa tanto del tratamiento impermeabilizante T1 como del tratamiento encalante T2, se encuentra la ejecución de una capa de tierra vegetal

que asegure el correcto desarrollo de la vegetación a implantar incluida en el proyecto, permita la absorción de las lluvias recibidas, disminuir la escorrentía y minimizar la percolación hasta el interior de los distintos depósitos.

Para calcular la profundidad de infiltración de las precipitaciones a través de dicha capa se ha utilizado el estudio llevado a cabo por Bodman y Colman. (*Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils, 1943*)

Dichos autores realizaron experimentos sobre el comportamiento de una lámina de agua tras un episodio de precipitación sobre columnas de suelo seco, determinando el contenido de agua en el suelo a diferentes profundidades en función del tiempo transcurrido desde el inicio de este proceso, para ello definieron cinco zonas para la interpretación del proceso ocasionado:

- **Zona 1:** de 1 a 1,5cm de espesor directamente sobre la superficie en el que se alcanza un contenido de humedad correspondiente a la saturación total. El espesor de esta zona saturada es independiente de la profundidad de mojado.
- **Zona 2:** por debajo de la capa saturada, donde el contenido de humedad decrece rápidamente con la profundidad hasta alcanzar un valor levemente superior al del punto medio, aproximadamente entre la capacidad de campo y la saturación total.
- **Zona 3:** zona de transición, en la que se transmite el agua y en la cual su contenido varía muy poco con la profundidad hasta que se llega al suelo seco.
- **Zona 4:** zona de rápido cambio del contenido de agua o zona de humedecimiento, donde la humedad del suelo disminuye rápidamente.
- **Zona 5:** denominada frente de humedecimiento y corresponde con la zona en que se transita abruptamente del suelo ya mojado al suelo seco (o con el contenido de agua inicial, si el suelo no estuviera totalmente seco).

Del frente de humedecimiento hacia capas más profundas, el suelo tiene el mismo contenido de agua que poseía antes de iniciarse el proceso de mojado. Para suelos de diferentes texturas, la velocidad con que avanza el frente de humedecimiento es también diferente, pero las curvas tienen siempre idénticas características, tal como se aprecia claramente en la ilustración 8.

Si desaparece la lámina de agua superficial, lo que ocurre cuando cesa la lluvia, el agua continúa redistribuyéndose en el suelo y el frente de humedecimiento sigue avanzando en profundidad hasta que el contenido de agua en toda la zona humedecida es igual a la capacidad de campo. Una vez que esto ocurre, el movimiento del agua se torna extremadamente lento, tendiendo a detenerse.

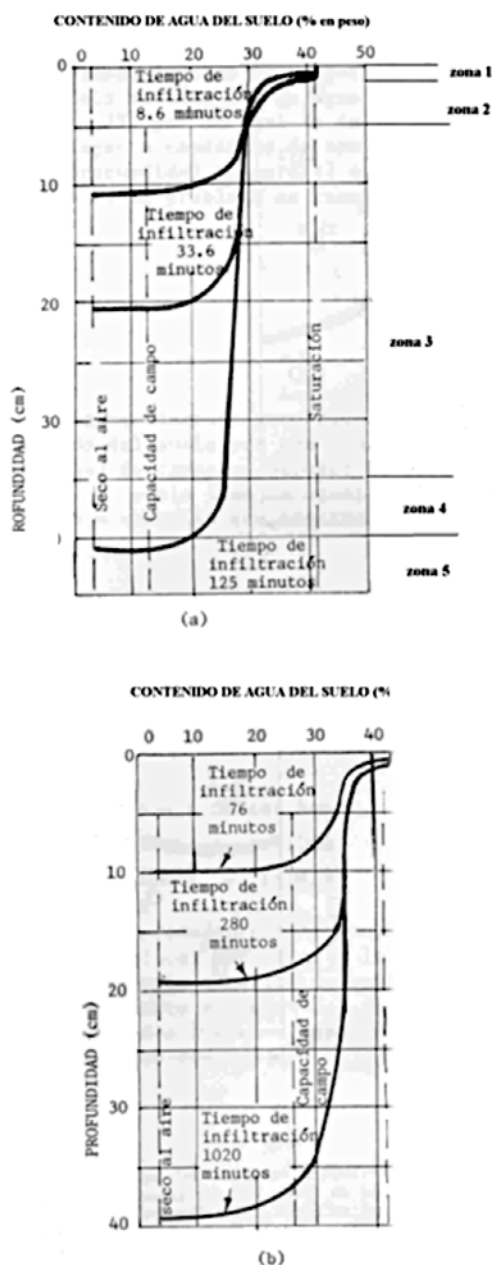


Figura 8. Curvas del contenido de humedad en función de la profundidad a diferentes tiempos de iniciado el humedecimiento para dos suelos: a) franco arenoso y b) franco limoso (Bodman y Colman).

En conclusión, se ha optado por definir el **espesor de dicha capa de tierra vegetal en 40 cm**, por ser este espesor suficiente para el desarrollo radicular de las especies vegetales a implantar.

Reforestaciones "T3"

En esta solución se incluye la creación de una nueva cobertura vegetal, así como aquellas soluciones que favorecerán las propiedades edáficas del suelo y contribuirán por tanto a la minimización de la escorrentía, el desarrollo del suelo y la biodiversidad y el paisaje.

Entre las alternativas que se han seleccionado para la consecución de los objetivos de restauración encontramos:

- 1) Alternativas referentes a la restauración de las propiedades edáficas del suelo
Los grupos de alternativas posibles referentes a la restauración de las propiedades edáficas del suelo se agrupan en dos tipologías:
 - a. Mantenimiento de las propiedades edáficas actuales: se descarta debido a que la actual situación de los suelos constituye y es razón de la alta cantidad de sedimentos y contaminantes que alcanzan el Mar Menor desde la Sierra Minera.
 - b. Mejora de las propiedades edáficas del suelo mediante fitoestabilización, ahoyado y aporte de tierra vegetación en el hoyo con posterior plantación, sellado de residuos mineros mediante tratamiento con material tipo encalante o plantación en zanjas de profundidad moderada.
- 2) Elementos de protección contra la erosión y estabilización de taludes tras movimiento de tierras
Los grupos de alternativas posibles referente a elementos de protección contra la erosión y estabilización de taludes tras movimiento de tierras se agrupan en dos tipologías:
 - a. No proteger los nuevos perfiles y suelos creados se descarta debido a que es necesario proteger y mantener la capa de tierra vegetal exterior aportada, esta capa será la que posibilitará el establecimiento de la vegetación y con este, la mitigación de la producción de sedimentos.
 - b. Protección mediante: Biorrollos, fajinas, mulching, refuerzo de escollera o muro de gaviones.
- 3) Alternativas contempladas para la corrección hidrológica
Los grupos de alternativas posibles referente a la corrección hidrológica se agrupan en dos tipologías:
 - a. No actuación, respetar las líneas de desagüe en su situación actual
 - b. Corrección de cauces y encauzamientos mediante Excavación para la adecuación de la sección del cauce mediante recubrimiento con hormigón, encachado de piedra caliza, muros de gaviones, acaballonado, motas de tierra para la creación de microcuencas endorreicas, cunetas, arquetas, pasos salvacunetas, badenes ...

4) Alternativas para la restauración del paisaje forestal y su integración paisajística

Los grupos de alternativas posibles referente restauración del paisaje forestal y su integración paisajística se agrupan en:

- Restauración pasiva: La restauración pasiva consiste en tratamientos silvícolas (si aplica), completándose con la eliminación de especies exóticas invasoras. Respetando y manteniendo los ecosistemas presentes. Algunos taludes de origen antrópico, debido a sus características de altura o difícil acceso se han incluido en las zonas de restauración pasiva, para estos, se plantea una medida adicional, denominada "Creación de puntos de vegetación en taludes".
- Plantación y siembra.

Otras obras complementarias

Se prevé una serie de obras auxiliares a las soluciones adoptadas que complementan las actuaciones principales de la remediación de los terrenos y sin las que no podría darse una solución integral al problema a tratar, estas son:

- Demoliciones previas
- Cerramientos
- Ejecución de drenajes internos
- Caminos de acceso
- Sistemas de control topográfico (Puntos de control, inclinómetros, etc.)

3.2.2. Actuaciones previstas en cada conjunto

Una vez estudiadas las distintas alternativas disponibles, y en base a los ensayos de suelo realizados y al asesoramiento de los distintos organismos y entida-

des a los que se ha consultado en el presente proyecto, se han definido para cada uno de los conjuntos las siguientes actuaciones:

Conjunto 1. Llano del Beal

Se trata de instalaciones de residuos mineros de diferentes envergaduras, aunque mayoritariamente con superficies de tamaño relativamente reducido, ubicándose en los alrededores del núcleo urbano del Llano del Beal. Los cauces de rambla que discurren por estos depósitos son ramificaciones de la conocida como Rambla de Mendoza y el Barranco de Ponce.

El conjunto 1 se sitúa en el entorno del núcleo urbano del Llano del Beal, está compuesto por 6 zonas de actuación.

- Parada FEVE.
- Potasa.
- San Agustín.
- Colindante Mendoza.
- Entorno Llano del Beal.
- Pobrecica.

Tras el análisis de los residuos existentes y debido a la tipología de los mismos se ha proyectado para su remediación la ejecución de la solución tipo T2 (tratamiento con material encalante).

CONJUNTO 1: NÚCLEO URBANO BEAL		
DENOMINACIÓN	CÓDIGO	TIPO DE TRATAMIENTO
Probrecica	MAPMM 404-R3-4_D2	Remodelación topográfica, T2
San Agustín	MAPMM 404-R3_TTEC	Remodelación topográfica, T2
Parada FEVE	MAPMM 404-R3_TTEC2	Remodelación topográfica, T2
Colindante Mendoza	MAPMM 404-R3_TTEC3	Remodelación topográfica, T2
Entorno Núcleo Urbano	MAPMM 404-R3_TTEC4	Remodelación topográfica, T2
Potasa	MAPMM 404-R3_TTEC5	Remodelación topográfica, T2

Tabla 3. Tratamiento según zona del conjunto 1.

En la mayoría de la superficie se prevé una remodelación topográfica suave, para posteriormente llevara a cabo el tratamiento T2 seleccionado.

Además, en las ramblas o ramblizos que cruzan las instalaciones de residuos mineros se llevará a cabo un encachado de piedra y la ejecución de muros de gaviones en el perímetro de los depósitos para el cierre del tratamiento realizado

En aquellas superficies donde sea preciso recoger y canalizar el agua de escorrentía, se proyectan tramos de cunetas, así como, en algunos casos, una red de drenes enterrados que servirán para recoger y canalizar el agua drenada en su superficie

Finalmente, se prevé el vallado del perímetro de los depósitos, salvo en puntos concretos donde su ejecución no sea viable.

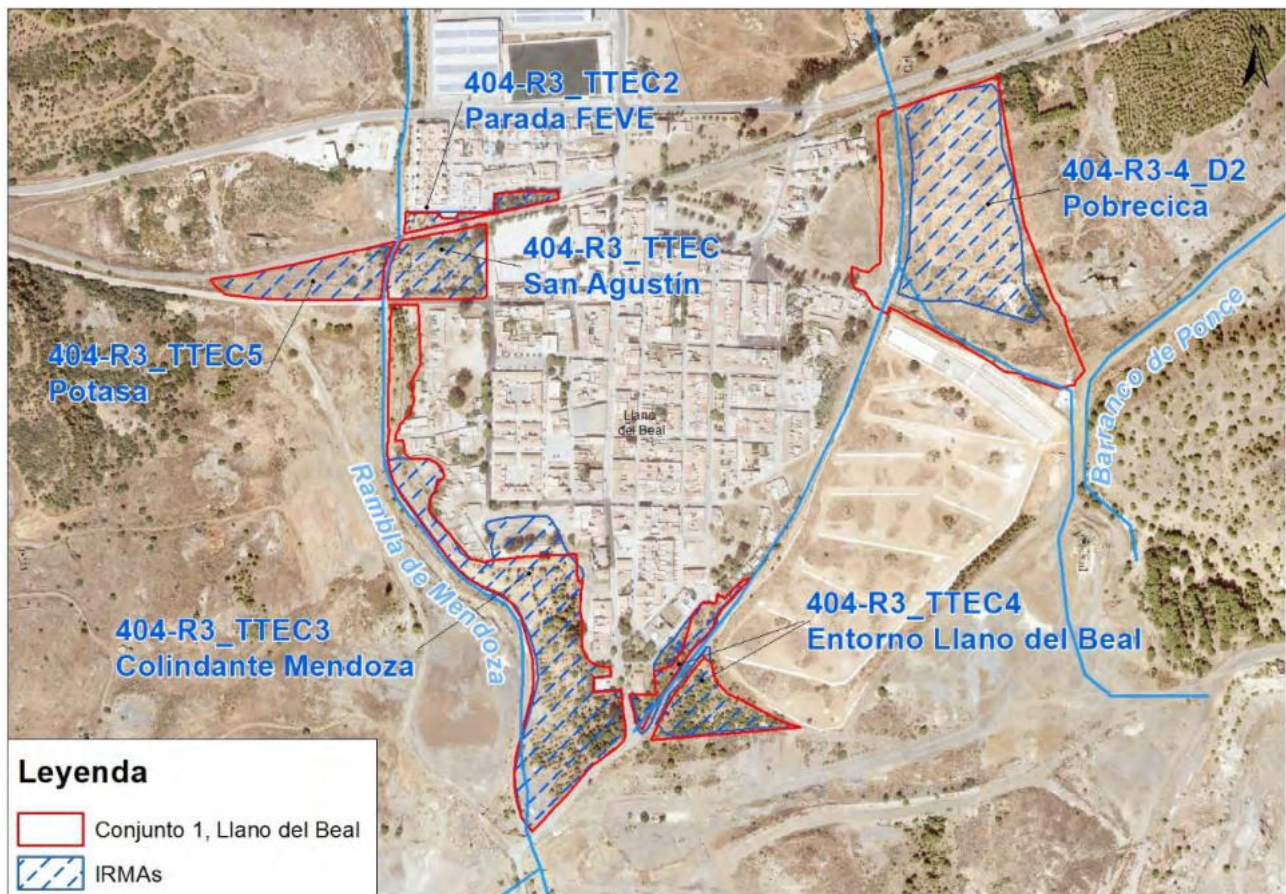


Figura 9. Situación del Conjunto 1 y su área de actuación.

Conjunto 2. Colegio de La Unión

Dentro del Conjunto 2, se incluye una única instalación de residuos mineros denominada como “Entorno Colegio e Instituto”, ubicándose cercano al núcleo urbano del municipio de La Unión.

Esta instalación está compuesta principalmente por escorias de fundición (popularmente conocidas como “gacheros”) acumuladas durante décadas. Estos materiales debido a su granulometría y composición no son tan fácilmente erosionables como los existentes en los depósitos mineros.

Este Conjunto 2 precisa por tanto de actuaciones diferentes, tanto de retirada del material existente, que posteriormente servirá de relleno en otras zonas, como de la remodelación topográfica de los taludes existentes. En la base de estos taludes se ejecutará un muro de escollera como elemento de sujeción y protección de los mismos.

En la tabla siguiente, se indica el tratamiento proyectado para el Conjunto 2:

CONJUNTO 2: ENTORNO COLEGIO E INSTITUTO		
DENOMINACIÓN	CÓDIGO	TIPO DE TRATAMIENTO
Entorno Colegio e Instituto	MAPMM 404-R1_T1	Remodelación topográfica

Tabla 4. Instalaciones de residuos mineros del Conjunto 2.

Tras el estudio hidrológico de la superficie, se proyecta un sistema de canalización y recogida del agua de escorrentía para períodos de lluvia, compuesto por tramos de cunetas y muros de gaviones.

Por otro lado, se proyecta la ejecución de diferentes tramos de caminos distribuidos por toda el área de

actuación, además, de un vallado perimetral de toda la superficie del Conjunto 2.

Todas las obras previstas en el Conjunto 2 se han proyectado respetando los elementos del patrimonio minero existentes en la zona de actuación.



Figura 10. Situación del Conjunto 2 y su área de actuación.

Conjunto 3. Benzales

El Conjunto 3 consta de un establecimiento minero principal denominado “Benzales”, que contiene tres zonas de influencia anexas de distinta naturaleza, siendo una de ellas un tramo de la Rambla del Miedo.

En esta zona existe una acumulación importante de material procedente de los depósitos mineros circundantes que se han ido depositando en la zona por arrastres durante décadas a través de la Rambla del Miedo.

La actuación planteada en este conjunto se basa en la retirada del material existente para su posterior uso como relleno en otras zonas del conjunto, y el remodelado topográfico de la superficie de las instalaciones de residuos mineros y el tendido de los taludes existentes. Una vez realizado el movimiento de tierras se aplicará el tratamiento tipo T2 mediante aporte de material encalante “filler calizo”.

En la tabla siguiente, se indica el tratamiento proyectado para el Conjunto 3:

CONJUNTO 3: BENZALES		
DENOMINACIÓN	CÓDIGO	TIPO DE TRATAMIENTO
Benzales	IGME 0977-4-0016	Remodelación topográfica, T2
Entorno Benzales A	MAPMM 404-R1_T7	Remodelación topográfica, T2
Entorno Benzales B	MAPMM 404-R1_TTEC3	Remodelación topográfica, T2
Entorno Benzales C	MAPMM 404-R1_C4	Remodelación topográfica, T2

Tabla 5. Instalaciones de residuos mineros del Conjunto 3.

En aquellas superficies donde sea preciso recoger y canalizar el agua de escorrentía, se proyectan tramos de cunetas y de gaviones, en casos concretos.

Debido al estado actual de la Rambla del Miedo, se proyecta un encachado de piedra y ejecución de muros de gaviones en toda su longitud.

Se realizarán dos tramos de caminos para el acceso a las obras y a diversas construcciones existentes.

Finalmente, se prevé el vallado del perímetro, salvo en puntos concretos donde su ejecución no sea viable.

Todas las obras previstas en el Conjunto 3 se han proyectado respetando los elementos del patrimonio minero existentes en la zona de actuación.



Figura 11. Situación del Conjunto 3 y su área de actuación.

Conjunto 4. Brunita

El Conjunto 4 consta de dos Instalaciones de residuos mineros abandonadas (IRMAs) o depósitos de lodos principales (Brunita y Pocilgas) junto con otras zonas aledañas a cada uno de los depósitos

Los tratamientos seleccionados para este Conjunto han sido la ejecución de barreras impermeabilizantes (T1) para los depósitos principales, el tratamiento a base de material encalante (T2)

en un depósito secundario y los entornos de ambos depósitos, el tratamiento denominado T4 que se ejecutará en la zona destinada a laminación de escorrentías, siendo el tratamiento T3 reforestación designado para las restantes zonas del Conjunto en las que no se encuentran residuos mineros.

A continuación, se relacionan cada una de ellas junto al tipo de tratamiento previsto:

CONJUNTO 4: BRUNITA		
DENOMINACIÓN	CÓDIGO	TIPO DE TRATAMIENTO
Brunita	IGME 0977-II-4-0021	Remodelación topográfica, T1, T2, T3, T4
Pocilgas	IGME 0977-4-0019 & IGME 0977-4-0020	Remodelación topográfica, T1, T2, T3
Entorno Pocilgas	MAPMM 404-R1_T3	Remodelación topográfica, T2
Entorno Benzales C	MAPMM 404-R1_C4	Remodelación topográfica, T2

Tabla 6. Instalaciones de residuos mineros del Conjunto 4.

Respecto a los cauces que discurren por la zona, se encacharán con piedra los de mayor envergadura (cauces de rambla y canales de guarda) además de las cunetas principales encargadas de recoger las escorrentías interiores revistiéndose con hormigón las cunetas secundarias que recogen sectores de los depósitos (taludes y plataformas).

Se proyectan además sistemas de drenaje interior mediante colectores en los depósitos en los que se establece el sistema de tratamiento T1. Junto a este sistema se colocará un sistema de drenaje independiente, compuesto por tubería dren y pozos de registro, para localizar los lixiviados que pudiera surgir del depósito de mayor magnitud.

Para aumentar la estabilidad del depósito de mayor magnitud se proyecta la ejecución de un entramado de columnas de grava para la mejora y refuerzo del conjunto, igualmente se incorporará un sistema de monitoreo de su geometría mediante la instalación de inclinómetros.

También se ejecutarán muros de gaviones en zonas en las que han de salvarse desniveles notables, así como para encintar los cauces existentes. Se prevé la colocación de escollera en la base de los taludes de mayor magnitud para evitar su erosión.

Se construirán caminos para el acceso a las obras y se prevé el vallado del perímetro, salvo en puntos concretos donde su ejecución no sea viable.



Figura 12. Imagen objetivo para Brunita.

Conjunto 5. Descargador

Los depósitos presentes en el Conjunto 5 Descargador son los denominados Descargador I, Descargador II y “Frente del Descargador II”. Se actuarán en estos tres depósitos de lodos remodelando en primer lugar su topografía, con el fin de aumentar su estabilidad y ordenar la escorrentía.

El tratamiento indicado para estos depósitos será el denominado como T1, escogiéndose el tratamiento

T2 para ciertas zonas de los entornos de cada uno de estos. Para las áreas dentro del entorno del Conjunto 5 con vegetación, pero sin presencia de residuos mineros se determina el tratamiento T3. Finalmente se establece en los cauces de rambla existentes el tratamiento de zonas húmedas T4.

A continuación, se relacionan cada una de ellas junto al tipo de tratamiento previsto:

CONJUNTO 5: DESCARGADOR		
DENOMINACIÓN	CÓDIGO	TIPO DE TRATAMIENTO
Descargador I	IGME 0977-II-4-027	Remodelación topográfica, T1, T2, T3, T4
Descargador II	IGME 0977-II-4-024	Remodelación topográfica, T1, T2, T3, T4
Frente Descargador II	IGME 097-4-025 & IGME 097-4-026	Remodelación topográfica, T1, T2, T3
Entorno Benzales C	MAPMM 404-R1_C4	Remodelación topográfica, T2

Tabla 7. Instalaciones de residuos mineros del Conjunto 5.



Figura 13. Imagen objetivo para el Descargador I.

Se ejecutará un sistema de drenaje formado por cunetas de hormigón para la recogida de aguas superficiales. Igualmente se prevé la construcción de

sistemas de drenaje interiores y un sistema de recogida para los posibles lixiviados en los depósitos principales.

Se procederá también al reacondicionamiento de los cauces de ramblas existentes que lindan con los depósitos, mediante el enchachado del lecho, incluida la colocación de capa de arcilla para aislar el cauce de los residuos existentes y la colocación en los márgenes de barreras realizadas con gaviones, con instalación de piel de escollera en los taludes de los grandes depósitos a fin de evitar la erosión de los mismos.

Al igual que en el depósito “Brunita” del Conjunto 4 referido anteriormente, para aumentar la estabilidad del depósito de mayor magnitud, en este caso “Descargador I”, se proyecta la ejecución de un entramado de columnas de grava para la mejora y refuerzo del conjunto y la instalación de inclinómetros para su monitorización.

Se ejecutarán tramos de caminos para el acceso a las obras y a diversas construcciones existentes, que servirán tanto para la ejecución de la obra como posteriormente para las labores de mantenimiento.

Todas las obras previstas en el Conjunto 5 se han proyectado respetando los elementos del patrimonio minero existentes en la zona de actuación. En el caso del conjunto 5 existirá, dentro de la zona de actuación, una zona de exclusión debido a la existencia de un yacimiento catalogado como de tipo B, donde se realizará una prospección arqueológica específica. Una vez se obtengan los resultados de esta prospección se determinará las actuaciones que podrán realizarse en dicha área.

Finalmente, se prevé el vallado del perímetro, salvo en puntos concretos donde su ejecución no sea viable.

Sancti Spiritu

En la zona del Conjunto 5 existe un depósito que no procede del rechazo que se generaba tras el proceso del lavado del material como el resto de las instalaciones de residuos mineros abandonados a los que nos referimos, sino que se trata de la acumulación de material durante la época en la que la industria minera de la sierra de Cartagena – La Unión estaba en pleno funcionamiento y éste no tenía suficiente riqueza. Por tanto, se trata en efecto de un depósito, pero no del sobrante tras el proceso del lavado y extracción del material, sino de un material que no pasó por un lavadero al no disponer de la suficiente riqueza o “ley” para su explotación, y se almacenó para su posible aprovechamiento posterior cuando la técnica o los precios lo permitieran. Este depósito se encuentra bajo el pico *Sancti Spiritu*, de ahí su nombre, y se trata de un depósito de “gossan” o material rico en hierro, cuyo volumen se estima entre 1 y 1,5 millones de m³.

En el caso de éste depósito no se utilizarán las soluciones diseñadas, sino que en primer lugar se estudiará su estabilidad actual para, una vez conocida, diseñar en caso de que se detecten inestabilidades actuaciones concretas. Estas actuaciones a su vez dependerán de si es necesario intervenir en superficie para minimizar que la erosión existente avance, o ha de hacerse de forma más profunda mediante sistema de contención diseñados al efecto. A la fecha de redacción del presente capítulo se está estudiando su estabilidad por lo que no es posible aventurar que tipo de intervención será necesaria.

Conjunto 6. Cuesta de las Lajas

El Conjunto 6, se encuentra al sur del núcleo urbano de La Unión y está compuesto por una instalación de residuos mineros y su zona de influencia o entorno, que se corresponde con el cauce de rambla (ramificación que desemboca

en la rambla del Miedo) y que discurre al este de la instalación.

A continuación, se relacionan cada una de ellas junto al tipo de tratamiento previsto:

CONJUNTO 6: CUESTA DE LAS LAJAS		
DENOMINACIÓN	CÓDIGO	TIPO DE TRATAMIENTO
Cuesta de las Lajas	PRASAM 0977-II-4-044	Remodelación topográfica, T1
Entorno Cuesta de Las Lajas	MAPMM 404-R1_C2	Remodelación topográfica, T1

Tabla 8. Instalaciones de residuos mineros del Conjunto 6.



Figura 14. Situación del Conjunto 6 y su área de actuación.

Las obras proyectadas en este Conjunto 6 se basan en el tratamiento impermeabilizante T1. Previo a este tratamiento, será necesaria una remodelación topográfica del terreno, que se llevará a cabo para regularizar las plataformas y perfilar los taludes existentes. Algunos de estos taludes estarán protegidos mediante muro de escollera y con cunetas para la recogida del agua de escorrentía.

Además, el tramo de rambla que discurre dentro del área de actuación del Conjunto 6 será acondicionado mediante encachado de piedra y muros de gaviones, incluso con ejecución de una capa de arcilla, como en los demás conjuntos, cuya función es intentar mantener aislado el cauce de los residuos existentes.

Al igual que en conjuntos anteriores, se prevé la ejecución de caminos de acceso a lo largo del Conjunto 6 y de un vallado perimetral de su área de actuación.

Por último, se llevará a cabo la eliminación de especies exóticas invasoras en ciertas áreas de este Conjunto 6, con el fin de reducir la amenaza para la diversidad biológica nativa y recuperar la entidad propia del ecosistema natural propio de la Sierra Minera Cartagena-La Unión.

Las obras previstas en el Conjunto 6 se han proyectado respetando los elementos del patrimonio minero existentes en la zona de actuación, que no comprometan la correcta ejecución de las obras y la seguridad de las personas que trabajen en ellas.

Conjunto 7. Marqués de Péjar

En relación al Conjunto 7, se incluyen dos instalaciones de residuos mineros denominadas “Marqués de

Pejar” y “Pajarillos”, en cuyas áreas se plantea la ejecución de los tratamientos siguientes:

CONJUNTO 7: MARQUÉS DE PÉJAR		
CÓDIGO	DENOMINACIÓN	TIPO DE TRATAMIENTO
PRASAM 0978-I-1-001	Marqués de Péjar	Remodelación topográfica en determinados taludes y T1 en áreas concretas
PRASAM 0978-I-1-009	Los Pajarillos	Remodelación topográfica en determinados taludes y T1 y T2 en áreas concretas

Tabla 9. Instalaciones de residuos mineros del Conjunto 7.

Ambos depósitos se encuentran en la actualidad reforestados en gran parte por lo que dispone de una capa de tierra vegetal aportada previamente, se llevará a cabo el tratamiento T1 previa remodelación topográfica en zonas concretas de los taludes que no disponen de cobertura vegetal y están siendo fuertemente erosionados, en el resto de la superficie se eliminarán especies invasoras en diferentes áreas de este Conjunto 7,

con el fin de reducir la amenaza para la diversidad biológica nativa y recuperar la entidad propia del ecosistema natural propio de la Sierra Minera Cartagena-La Unión.

En algunas zonas del depósito denominado Los Pajarillos, existen áreas de superficie contaminada que serán remediadas con el tratamiento a base de material encalante T2.



Figura 15. Situación del Conjunto 7 y su área de actuación.

Se prevé la ejecución de caminos interiores para facilitar el acceso al Conjunto 7, además del vallado perimetral de toda su área de actuación.

Actualmente, se están llevando a cabo analíticas foliares de la vegetación presente en esta área de actuación para determinar las concentraciones de metales y metaloides existentes en su parte aérea. En

caso de que los resultados de estas analíticas arrojen valores de concentraciones desfavorables, se procedería a valorar la eliminación de esta vegetación y a complementar la solución.

Todas las obras previstas en el Conjunto 7 se han proyectado respetando los elementos del patrimonio minero existentes en la zona de actuación.

Conjunto 8. Peña del Águila y Pantano de la Rosa

En el Conjunto 8 se ubican, principalmente, cinco instalaciones de residuos mineros abandonados junto con varios entornos o emplazamientos también

afectados por la actividad minera. En la tabla siguiente, se muestra la relación de los mismos y el tipo de tratamiento proyectado para cada caso:

CONJUNTO 8: PEÑA DEL ÁGUILA		
CÓDIGO	DENOMINACIÓN	TIPO DE TRATAMIENTO
IGME 0978-1-0019	Pantano de La Rosa B	Remodelación topográfica, T1
MAPMM 404-R3_T4	Julio César	Remodelación topográfica, T1
IGME 0978-1-0025	Pantano de La Rosa-A	Remodelación topográfica, T1
MAPMM 404-R3-R5-TTEC	Entorno Pantano de La Rosa	Remodelación topográfica, T2 y T4
PRASAM 0978-I-3-021	Peña del Águila II	Remodelación topográfica, T1
PRASAM 0978-I-3-022	Peña del Águila I	Remodelación topográfica, T1
MAPMM 404-R5_T1	Entorno Peña del Águila II-A	Remodelación topográfica, T1
MAPMM 404-R5_T2	Entorno Peña del Águila II-B	Remodelación topográfica, T2
IGME 0978-1-0023	Pantano del Mercader	Remodelación topográfica , T3

Tabla 10. Instalaciones de residuos mineros del Conjunto 8.

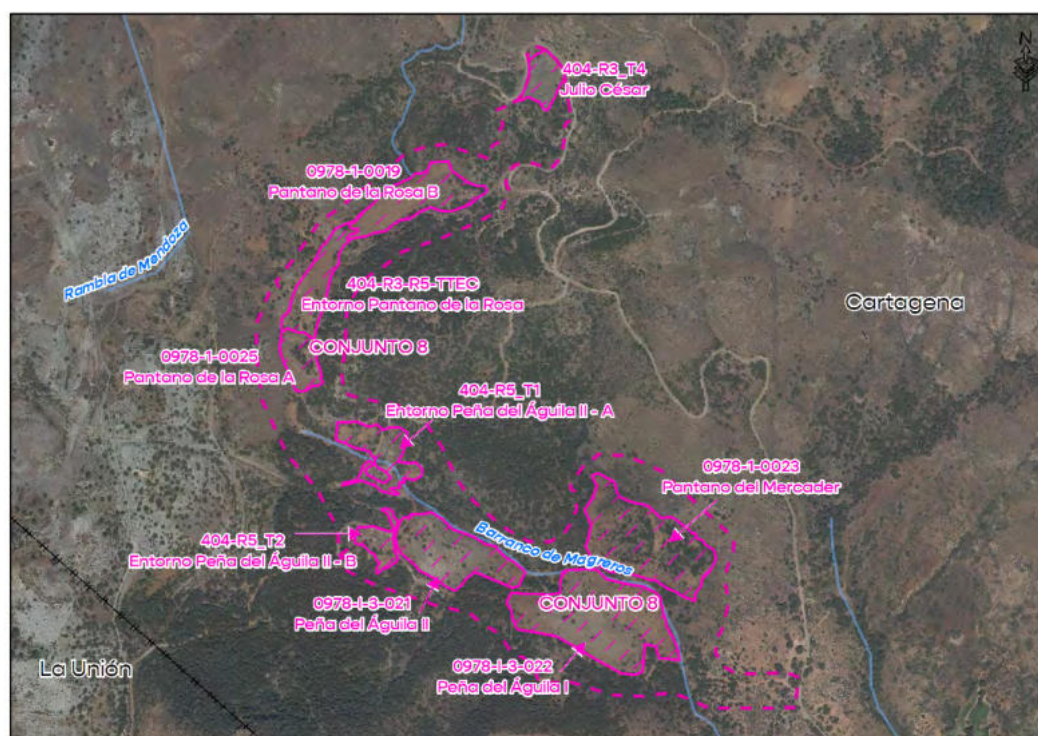


Figura 16. Situación del Conjunto 8 y su área de actuación.

Las principales instalaciones de residuos mineros de este Conjunto 8 serán tratadas mediante el empleo de capas impermeabilizantes T1, previa remodelación topográfica, junto con el tendido de sus taludes, la realización de muros de escolera y conexión con sistemas de drenaje superficial compuestos por cunetas y gaviones de protección, lo cual aportará mayor seguridad estructu-

ral y reducirá el aporte de sedimentos a las ramblas cercanas.

En el caso de la zona denominada “entorno pantano de la rosa” se tratará mediante la ejecución del tratamiento tipo T2, esto es, aporte de material encalante, ejecutándose, además, una actuación de impermeabilización del cauce que se crea en su zona más alta, por

ser está el nacimiento de la rambla de Mendoza hacia el norte y del barranco de magreros hacia el sur

El resto del área de actuación del Conjunto 8 se encuentra parcialmente revegetada, por lo que se prevé realizar actuación de eliminación de especies exóticas y refuerzo de la vegetación existente mediante reforestación o tratamiento tipo T4 con el objeto de completar la recuperación y restauración del Conjunto 8, junto con una completa integración paisajística de esta zona degradada por la actividad minera.

Otra de las actuaciones previstas, es la del encachado de piedra y ejecución de muros de gaviones en el

tramo de rambla que circula a lo largo del Conjunto 8, de esta forma se prevé canalizar y dirigir el paso del agua por la zona, disminuyendo la erosión y el arrastre de contaminantes.

Además, se prevé la ejecución de caminos interiores para facilitar el acceso al Conjunto 8, además del vallado perimetral de toda su área de actuación, salvo en aquellos puntos donde no sea viable.

Como en los anteriores conjuntos, las obras previstas en el Conjunto 8 se han proyectado respetando los elementos del patrimonio minero existentes en la zona de actuación.

Conjunto 9. Torrecica

En la tabla siguiente, se muestra la relación de las diferentes instalaciones de residuos mineros que se encuentran en el Conjunto 9:

CONJUNTO 9: TORRECICA		
DENOMINACIÓN	CÓDIGO	TIPO DE TRATAMIENTO
Entorno Torrecica II-A	MAPMM 404-R1_D7	Remodelación topográfica, T2
Torrecica I	IGME 0977-4-0009A	Remodelación topográfica, T2
Torrecica II-B	IGME 0977-4-0010	Remodelación topográfica, T2
Torrecica II-C	IGME 0977-4-0011	Remodelación topográfica, T2
Torrecica II-D	IGME 0977-4-0014	Remodelación topográfica, T2
Torrecica II-A	IGME 0977-4-0009B	Remodelación topográfica, T2
Entorno Esparza I-B	MAPMM 404-R1_D9	T3
Esparza I-A	IGME 0977-4-0003	T3
Esparza I-B	IGME 0977-4-0004	T3
Esparza I-C	IGME 0977-4-0005	T3
Esparza I-D	IGME 0977-4-0006	T3
Esparza I-E	IGME 0977-4-0007	T3
Esparza I-F	IGME 0977-4-0008	T3
Entorno Torrecica II-B	MAPMM 404-R1_T5	Remodelación topográfica, T2
Entorno Torrecica I	MAPMM 404-R1_C3	Remodelación topográfica, T2
Entorno Esparza I-A	MAPMM 404-R1_TTEC4	T3

Tabla 11. Instalaciones de residuos mineros del Conjunto 9.



Figura 17. Situación del Conjunto 9 y su área de actuación.

Estas instalaciones de residuos mineros cuentan en algunas de sus zonas con vegetación de distinto porte, por lo que la actuación prevista es la de tratamiento tipo encalante T2 en aquellas zonas donde el arbolado no se haya desarrollado y reforestación T3 en zonas donde la vegetación haya cubierto su superficie. Para disminuir la escorrentía y erosión en taludes será necesario el remodelado topográfico de algunos de ellos, disminuyendo la pendiente y construyendo elementos de protección como escolleras y líneas de gaviones, así como el uso de elementos de bioingeniería como mantas orgánicas, biorollos, etc.

Se prevé igualmente la ejecución de caminos interiores para facilitar el acceso al interior de la zona de actuación, además del vallado perimetral de toda su área de actuación, salvo en aquellos puntos que no resulte viable.

En esta área, al igual que en el resto de conjuntos mineros existen elementos del patrimonio minero que se respetarán para su conservación.

Bibliografía

- Arranz González, J.C., Rodríguez Gómez, V., Rodríguez Pacheco, R. (2019). GUÍA PARA LA REHABILITACIÓN DE INSTALACIONES ABANDONADAS DE RESIDUOS MINEROS.
- Bodman, G. B. and Colman, E. A.: 1943, Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils, Soil Sci. Soc. Am. Proc. 8, 116-122
- Instituto Geológico y Minero de España. (2017). *Informe sobre la restauración de espacios mineros: Retos y avances en España*. Instituto Geológico y Minero de España. <https://www.igme.es/restauracion-minera>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). *Plan nacional para la restauración de espacios degradados por la minería en España*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/restauracion-mineria>

3.3. Aplicación de soluciones a la restauración hidrológico-forestal

AUTORES: Juan Manuel Domingo, Jaime Talavera Sánchez, Nadia García Ruiz. Grupo TRAGSA. Delegación Murcia.

3.3.1. Introducción

Este capítulo se centra en exponer las soluciones aplicadas al grupo de proyectos denominados “restauración hidrológico-forestal”, que da respuesta a la siguiente previsión del MAPMM dentro de la línea 2.3. “la recuperación y restauración del medio natural, mediante la restitución topográfica de las laderas afectadas por la minería, la recuperación de la vegetación en las laderas de la sierra y la revegetación de la red hidrográfica”.

Como se expuso en el capítulo sobre el catálogo general de actuaciones, este tipo de proyectos ponen el foco en terrenos afectados por la actividad minera que no constituyen suelos altamente contaminados ni IRMAs: laderas y vaguadas afectadas por escombreras y fuertes movimientos de tierras (en especial desmontes), por lo general deforestadas y con graves problemas de erosión.

En la zona de actuación existen distintas situaciones, lo que conlleva un trabajo de análisis detallado para seleccionar la opción más adecuada, trabajando con una metodología caso por caso.

En el RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL DE LAS CUENCAS VERTIENTES AL MAR MENOR UBICADAS EN LA SIERRA MINERA, TM DE CARTAGENA se identifican 6 zonas de terrenos afectados por la actividad minera que no constituyen suelos altamente contaminados ni IRMAs. Estas zonas de actuación quedan reflejadas en la tabla e imagen adjuntas:

RESUMEN SUPERFICIES	ZONA ACTUACIÓN
Zona 1 - Santa Lucía	92,78
Zona 2 - Ocasión	72,54
Zona 3 - El Porvenir	44,01
Zona 4 - La Reservada	48,05
Zona 5 - La Rosa	39,29
Zona 6 - Los Blancos	133,63
Total	430,30

Tabla 1. Superficie de las 6 zonas de actuación del proyecto RHF.

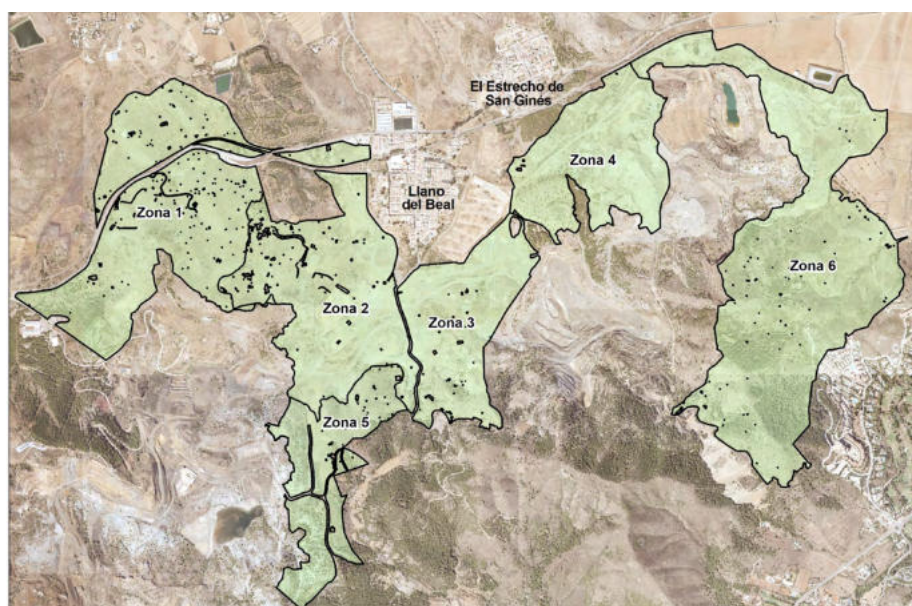


Figura 1. Situación de los 6 emplazamientos que forman el proyecto RHF.

De las 430,30 hectáreas de superficie a restaurar, se han diferenciado diferentes grupos de actuaciones según la magnitud de las necesidades específicas de la actuación:

1) **Actuaciones de remodelación topográfica**

- a. Estabilización de taludes
 - i. Desmonte y terraplén
 - ii. Apertura de bermas en talud
 - iii. Retaluzados
- b. Acondicionamiento de terrenos en pendientes moderadas
 - i. Regularización y acondicionamiento de terrenos
 - ii. Rotura de la compactación superficial del suelo
 - iii. Creación de plataforma de trabajo

2) **Restauración de las propiedades edáficas del suelo**

- a. Cubrimiento de los suelos actuales con capa de tierra vegetal exterior
- b. Sistema de sellado de residuos mineros mediante tratamiento con material tipo encalante

3) **Elementos de protección contra la erosión y estabilización de taludes tras movimientos de tierras**

- a. Birrollos
- b. Fajinas
- c. Mulching manual
- d. Refuerzo de escollera apoyada en pie de talud
- e. Muro de gaviones

4) **Actuaciones de corrección hidrológica**

- a. Obras de drenaje superficial
 - i. Encauzamientos
 - ii. Bajante escalonada de aguas pluviales
 - iii. Acaballonado
 - iv. Unidad de zanja y caballón
 - v. Apertura de cunetas
- b. Obras transversales a cauces
 - i. Albarradas
 - ii. Diques de mampostería hidráulica
 - iii. Muro gaviones
 - iv. Obras en cunetas y otras líneas de desagüe menores
 - v. Rastrillos

5) **Restauración del paisaje forestal**

- a. Restauración pasiva,
- b. Plantaciones de arbolado y matorral
- c. Retirada de vegetación exótica invasora

3.3.2. Descripción de las soluciones adoptadas

Actuaciones de Remodelación topográfica y corrección hidrológica

Las actuaciones de remodelación topográfica comprenden los trabajos previos a todas las actividades de restauración a realizar. Estos trabajos son modificaciones de la topografía con el fin de crear condiciones diferentes a las actuales con el objeto de retener agua o conseguir una evacuación ordenada de la misma. Entre estas últimas, se engloban el colapso de cárcavas y taludes aislados, además de la creación de microcuencas endorreicas diseñadas para la captura de escorrentía.

a. Estabilización de taludes

El objeto de esta actuación es la remodelación topográfica de taludes y la adecuación de las su-

perficies actuales a otras más adecuadas para el establecimiento de la vegetación y la retención de escorrentía, con el objetivo de disminuir la carga de sedimentos.

Desmonte y terraplén

Mediante movimientos de tierras (**desmontes y terraplenes**), se reajustan las pendientes de los taludes, como norma, **mínimo a relación 3H:1V** y cuando ha sido posible, a pendientes más suaves, pretendiendo siempre ajustarse al terreno para minimizar el movimiento de tierras.

Apertura de bermas en talud

Apertura de **plataformas en los taludes de 5m de ancho**. Estas plataformas servirán de caminos de tránsito y cuando el terreno lo permita, se crearán

plataformas de mayor anchura con el fin de llevar a cabo repoblaciones en estas.

Estas plataformas estarán **orientadas a contrapendiente 2%**, con objeto de disminuir la escorrentía sobre el talud. Las cunetas se ubicarán en la zona de menor cota para recoger las aguas pluviales y asegurar la evacuación ordenada de la escorrentía.

Retaluzados:

Se trata de la restauración del perfil del talud cuando estos presenten una total degradación de la estructura del suelo (ausencia de perfiles edáficos) y grandes procesos erosivos. Esta medida solo es aplicable en taludes de escasa altura o en la primera de una serie de bermas.

b. Acondicionamiento de terrenos en pendientes moderadas

Medidas similares a las anteriores, pero en condiciones de menor pendiente donde no es necesaria la modificación de taludes, comprenden desde terrenos llanos hasta el 33% de pendiente máxima. El objetivo es de nuevo reconstruir o preparar una estructura de suelo más propicia para la retención de agua y el establecimiento de vegetación.

En la medida de lo posible se busca siempre la creación de condiciones “a contrapendiente” para potenciar la infiltración de agua en la zona restaurada y ordenar la escorrentía producida.

Regularización y acondicionamiento de terrenos

Esta actuación busca modificar la superficie de terrenos de pendientes moderadas o bajas ocupados generalmente por irregularidades y cárcavas de mediana-pequeña entidad. Se contemplan actuaciones de nivelación del terreno, eliminación de cárcavas e irregularidades, alteración de la pendiente, etc.

Rotura de la compactación superficial del suelo

El objetivo del descompactado se centra en romper la costra o compactación superficial del suelo, esta aparece de manera natural en la sierra o tras reali-

zación de trabajos de modificación topográfica que conllevan el uso de maquinaria pesada, como pueden ser movimientos de tierra en taludes o tras regularizaciones de terrenos.

Con este tratamiento se posibilita la penetración de las raíces a una mayor profundidad y en ningún caso comprende la mezcla o volteo de horizontes, siendo su objetivo simplemente romper la compactación del suelo.

Subsolados

Se trata de una medida similar a los retaluzados, pero con ejecución en terrenos llanos. El objetivo es el mismo, reconstruir o preparar una estructura de suelo más propicia para la retención de agua y el establecimiento de vegetación. Se busca siempre la creación de condiciones “a contrapendiente” para potenciar los elementos anteriormente citados.

Creación de plataforma de trabajo en Instalaciones de residuos mineros abandonados (IRMAs)

Dado que en muchas ocasiones las Instalaciones de Residuos Mineros Abandonados presentan forma de montículo o están esparcidas por el terreno, el primer paso para el sellado de la IRMA y la aplicación del tratamiento con material encalante, del tipo T2 expuesto en el capítulo 3.2. es la creación de una **plataforma de trabajo** con los residuos mineros presentes.

Restauración de las propiedades edáficas del suelo

Re-adecuación de las propiedades físico-químicas del suelo, lo cual posibilitará el establecimiento de la vegetación. Con esto, se conseguirá mejorar la retención de agua en el suelo, disminuir los procesos de producción de escorrentía y restablecer la biodiversidad de la sierra y el paisaje forestal.

Aporte y extendido de una capa de tierra vegetal

Aporte y extendido de una capa de tierra vegetal de 30 cm, sobre suelos degradados por la actividad minera, previamente regularizados. A esta capa de tierra vegetal se le aplicará un leve compactado para limitar posibles problemas erosivos.



Figura 2. Imagen del aporte y extendido de capa de tierra vegetal.

Sistema de sellado de residuos mineros mediante tratamiento con material tipo encalante

Este tratamiento tiene como finalidad corregir la acidez para minimizar la liberación de los metales al medio, determinándose entre las posibles alternativas disponibles para el tratamiento completo de las IRMAs, la construcción de una serie de capas que constan de la adición de un material tipo encalante (con una riqueza en carbonato cálcico superior al 90%) para la corrección del pH, complementándose con otras capas de distintos materiales que realizarán de forma conjunta las tareas de neutralización de metales y metaloides, rotura de capilaridad y protección ante erosión hídrica y eólica. Con este diseño se pretende impedir la presencia de los re-

síduos en las capas más superficiales del terreno, confinando los mismos, y reduciendo la contaminación por escorrentía hídrica y eólica al entorno inmediato.

El material de tipo encalante seleccionado para todos los casos es el **filler de mármol**, debido a su alto potencial neto de neutralización, además de su clasificación como material inerte o no peligroso, este material produce la neutralización de la acidez del suelo y la reducción de la movilidad de los metales existentes

Finalmente, se aportará una capa de tierra vegetal de 30 cm y se llevarán a cabo plantaciones y siembras sobre esta.

Una vez definido todo lo anterior, el sistema de sellado proyectado se compone de forma inicial de las siguientes capas (en orden de ejecución):

- **Capa 1:** aporte de material tipo encalante (filler de mármol) según dosificación definida con anterioridad, como solución a los problemas de acidez, acidez oxidable, alta salinidad y pobreza de nutrientes de los suelos. Posteriormente al aporte se procede al escarificado, mediante tractor con rejonas acopladas y remoción de este con la superficie de la IRMA, a una profundidad de 40 cm. La remoción se realiza mediante motoazada, rotovator o apero equivalente, montado sobre tractor.
- **Capa 2:** capa de geotextil de 200 gr/m² para mejorar la estabilización y separación de los distintos materiales que conforman la solución.
- **Capa 3:** 20 cm de gravas calizas de granulometría 20 mm para evitar la capilaridad.
- **Capa 4:** Capa de geotextil de 200 gr/m² para mejorar la estabilización y separación de los distintos materiales que conforman la solución.
- **Capa 5:** 30 cm de tierra vegetal para evitar la dispersión eólica de materiales contaminantes y como base para plantaciones de vegetación.
- **Capa 6:** Plantación y siembra, para conseguir la implantación de una cobertura vegetal forestal y la reducción de la erosión superficial.

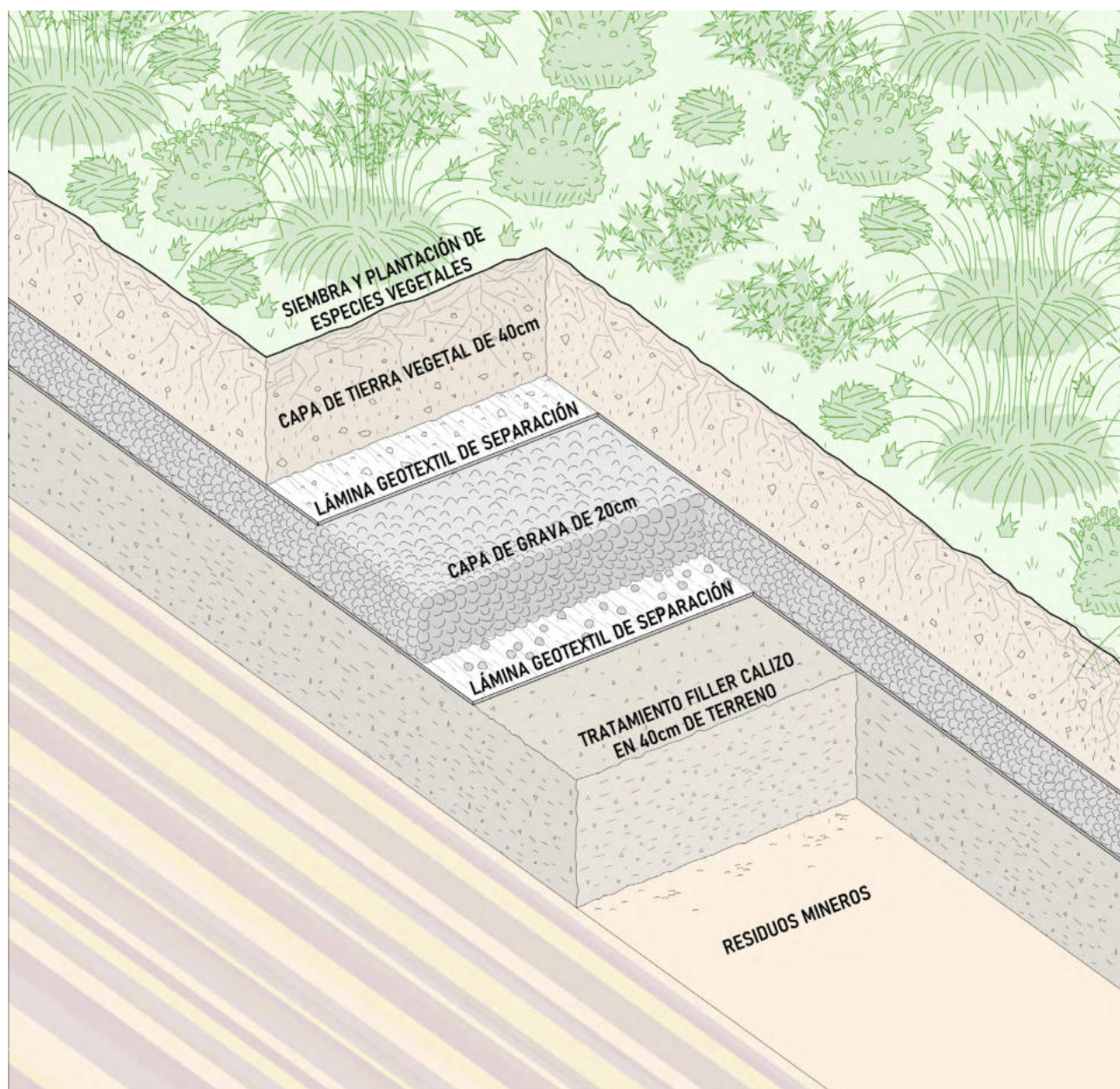


Figura 3. Sistema de sellado de residuos mineros mediante tratamiento con material tipo encalante (tratamiento T2).

Elementos de protección contra la erosión y estabilización de taludes tras movimientos de tierras

Biorrollos

Mediante los biorrollos se obtienen soluciones naturales para lograr la estabilización de taludes, revegetar zonas y controlar la erosión por escorrentía. Son estructuras cilíndricas fabricadas con matriz de fibras de coco, de alta densidad y comprimidas, envueltas en una red estructural exterior de material biodegradable. Se fabrican en fibra de por su gran resistencia a la tensión, por su grado ideal de descomposición y su gran capacidad de retención de humedad.

Los biorrollos tendrán unas dimensiones de **3m de longitud y 30 cm de diámetro** y serán fijados al terreno mediante estacas de madera, piedras o barras de acero corrugado.

Los biorrollos se usarán únicamente sobre taludes y laderas y se dispondrán al **tresbolillo**, con solape de mínimo 50 cm entre líneas paralelas. Se dispondrán siguiendo curvas de nivel con una separación vertical de 6 metros, entre el marco de plantación. Lo anterior se resume en la siguiente ilustración:

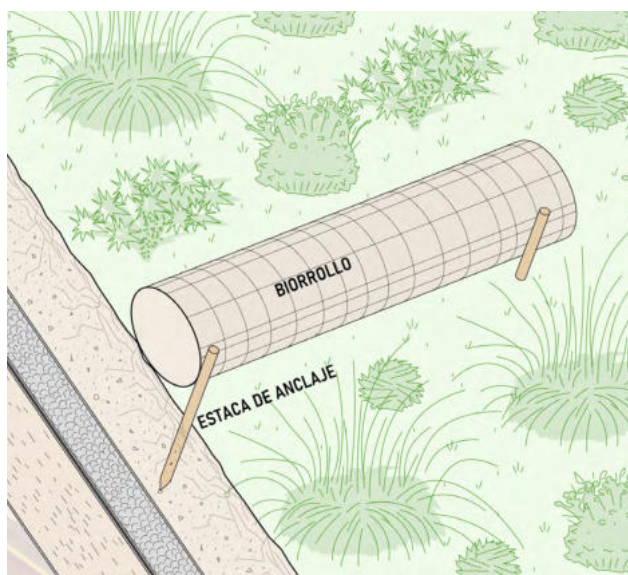


Figura 4. Biorrollos.

Fajinas

Las fajinas son obstáculos muy efectivos en el control de la erosión laminar, gracias a su capacidad de

retención de agua. Están formadas por restos de cortas forestales dispuestas a modo de barreras lineales por curva de nivel.

Esta actuación sólo se llevará a cabo en caso de disponer de madera de alguna corta cercana.

Las fajinas se distribuirán **a tresbolillo, apoyadas en los caballones** realizados sobre la tierra vegetal aportada, con el fin de proteger estos caballones. El **distanciamiento vertical de las líneas fajinas será de 6 metros, sobre los caballones ubicados entre el marco de plantación.**

Las fajinas se compondrán de troncos de un largo de 3 a 5 metros, fijados al suelo mediante 2-3 estacas de madera. La altura de las fajinas será la que marque el caballón, 30 cm. Las ramas de los troncos apeados se ubicarán entre el caballón y la fajina, como elemento de protección adicional.

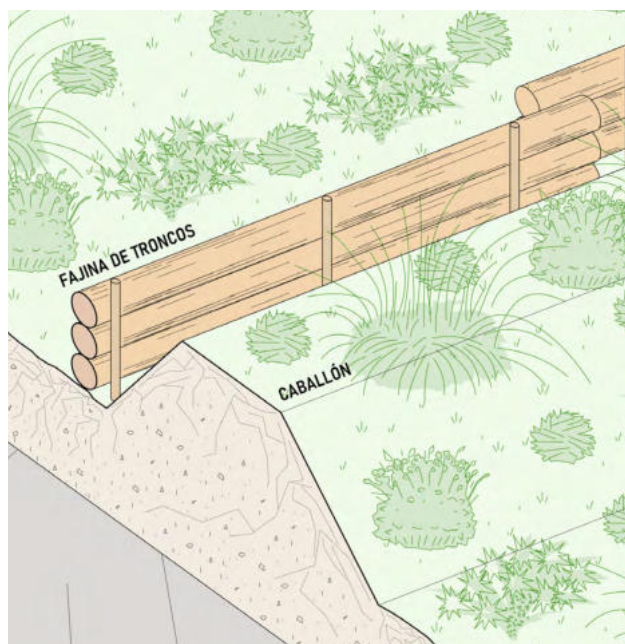


Figura 5. Aplicación de caballón y fajinas.

Mulching

La aplicación de mulching a base de paja, persigue disminuir la erosión causada por el impacto de las gotas de lluvia contra la superficie del suelo, además de aumentar la infiltración y disminuir la velocidad de escorrentía al suponer una barrera física al paso del agua.

Se aplicará de forma manual y aplicando una dosis de 1,76 t/ha, creando una capa de 1,5 cm de espesor, nunca superior a 2 cm. Será muy importante no

sobrepasar en ningún momento los 2 cm de espesor para no poner en riesgo la germinación de las semillas sembradas. Este es el espesor mínimo para que la capa de mulch ofrezca sus prestaciones, a la vez que, es el espesor máximo para no interferir con la germinación de las semillas aplicadas en la siembra.

Refuerzo de escollera apoyada en pie de talud

El refuerzo de escollera tiene una doble función, por un lado, la de contener las tierras del talud favoreciendo su estabilidad, y por otro, proteger el pie de talud e impedir que el agua de escorrentía erosione o descalce el pie de este.

Una vez los taludes han sido regularizados mediante movimiento de tierras, se aportará la escollera en la base de cada uno de ellos. En definitiva, la actuación consiste en piedra de escollera adosada o acoplada al pie de talud.

La altura de la escollera será 3 metros y vendrá adosada al talud. Para su ejecución, se procede a realizar la **excavación de una zanja de al menos 50 cm, esta funciona de cimentación o base de suelo compactado, con objeto de estabilizar la base de la escollera**. A continuación, se irán colocando rocas **o piedras en la parte inferior de la escollera** para que no se deslice y, posteriormente, se irán colocando **filas de rocas horizontalmente hasta alcanzar la altura deseada**. El tamaño de las rocas será igual o mayor a **60 cm**

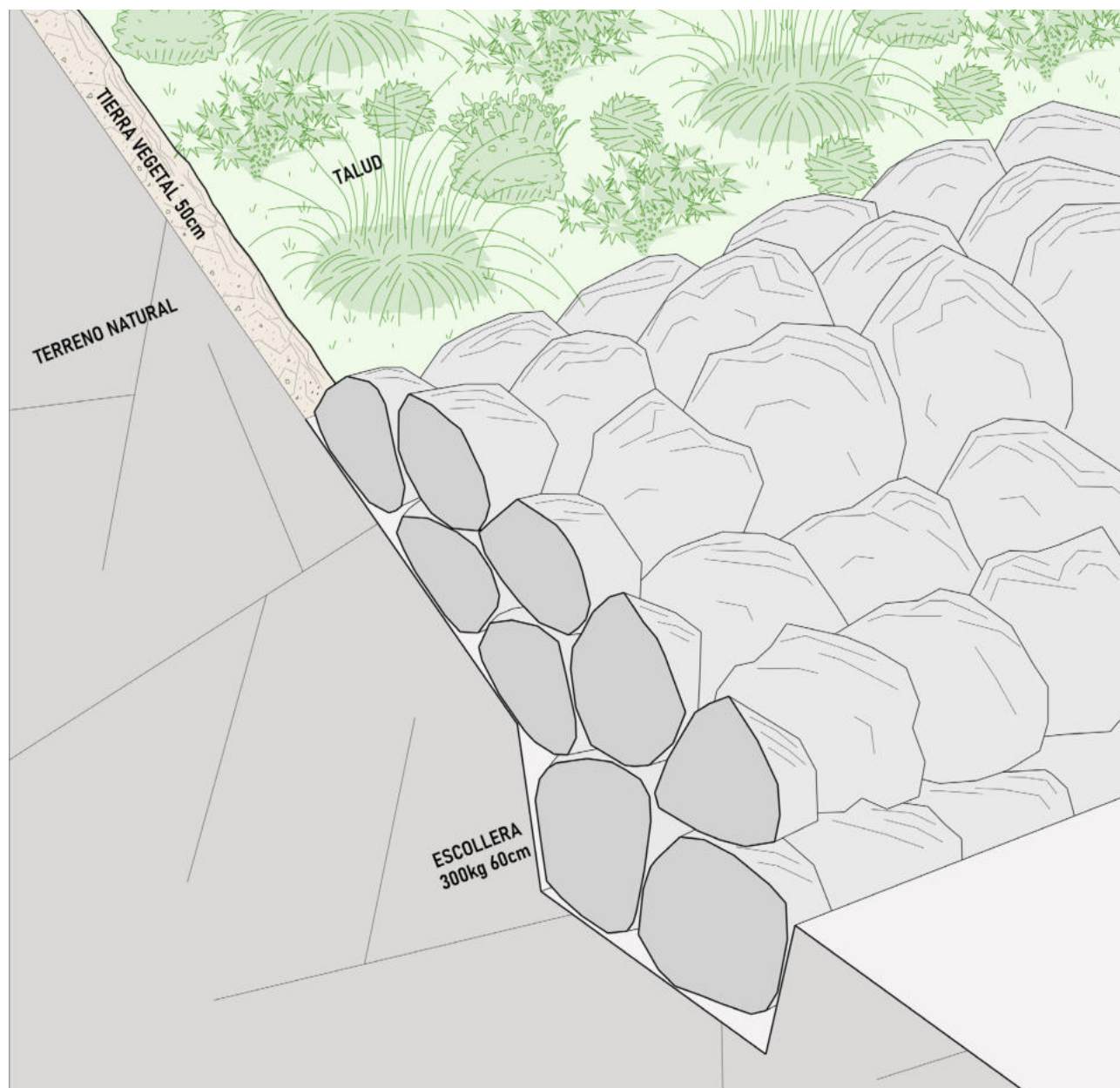


Figura 6. Refuerzo de escollera apoyada en pie de talud.

Muro de gaviones

Los gaviones forman estructuras modulares destinadas a la solución de problemas geotécnicos, hidráulicos y de control de la erosión, evitando la posible entrada al cauce de material de arrastre de los márgenes y/o laderas al mismo, aportándole estabilidad y consistencia. A modo de resumen la ejecución comienza con la excavación de una zanja, en esta se aplica una capa de hormigón que funciona como zapata. Tras esto, se coloca el muro de gaviones, comenzando con la red o jaula metálica, y una vez ha sido colocada, esta se rellena con piedras.

Actuaciones de corrección hidrológica

Se pueden describir como obras de defensa contra la erosión y contra las inundaciones, además de servir como elementos de contención y protección ante posibles deslizamientos de laderas y taludes.

En ocasiones, estas actuaciones pueden suponer la adecuación y dimensionamiento de la sección del cauce en cuestión, para ello se llevará a cabo el cálculo del caudal de diseño mediante el "método racional".

El uso de cemento en encauzamientos se circunscribe a las cunetas colindantes a los caminos, para el resto de encauzamientos se optará por geotextiles o encachado de piedra.

a. Obras de drenaje superficial

Se trata de actuaciones lineales enfocadas a evacuar ordenadamente, obstaculizar o atrapar la escorrentía. Son necesarias cuando no es posible actuar sobre una zona de producción de sedimentos debido a su difícil acceso, gran pendiente y/o altura. En este caso, lo adecuado es aislar esta zona, así como a los sedimentos y a la escorrentía producidos. Las obras de protección hidrológica podrían ser:

Encauzamientos

El encauzamiento es la excavación de la sección calculada a través de estudios hidrológicos de una línea de desagüe de cuenca. Esta puede ser de nueva creación o la adaptación de una cárcava actual en terreno, según necesidades.

Permite la evacuación controlada de escorrentías y estabilización de cárcavas actuales, mediante la adecuación de la sección al caudal a evacuar y protección del lecho y taludes.

La sección tipo de todos los canales será trapezoidal. La base del cauce o lecho se protege mediante la ejecución de un encachado o enlosado de piedra caliza sobre su superficie sin hormigón u otro tipo de argamasa, esta se ubicará sobre una cama de grava de un espesor de 20 cm. Su principal función es proteger el lecho ante la erosión, sin disminuir en exceso la sección hidráulica del mismo. La dimensión del encachado dependerá de la sección existente del cauce, proyectándose también su continuidad en parte de los márgenes, aumentando así su protección. En cuanto a los taludes del cauce, podrán reforzarse mediante muros de gaviones o dejarse al descubierto, realizándose plantaciones sobre estos.

El objetivo final es la colonización de estos cauces por parte de la vegetación.

Bajante de aguas pluviales

Se trata de infraestructuras instaladas como solución a la necesidad de evacuar aguas pluviales por lugares a diferente cota desde el sistema de drenaje hasta cauce de evacuación.

Acaballonado

El objeto de esta actuación es interrumpir el paso de la escorrentía e impedir la generación de cárcavas o regueros y aumentar la infiltración en el suelo. Los caballones son líneas de tierra en forma de montículo continuo.

El acaballonado se realiza a la vez que se aporta la capa de tierra vegetal en terrenos llanos. Los caballones se construyen usando la tierra vegetal aportada, bajo ninguna circunstancia se utiliza el suelo presente antes del extendido de la capa de tierra vegetal para la construcción de caballones.

El distanciamiento entre estos es de **un caballón cada 6m, entre el marco de plantación**. Entre caballón y caballón se crean condiciones a **contrapendiente del 2%**. Por último, La altura del caballón será de **30cm**, colocados siempre siguiendo curva de nivel.

Zanja – Caballón

Esta actuación se basa en la excavación de una zanja, a modo de cuneta, sin usar ningún tipo de revestimiento sobre el encauzamiento excavado.

Cumpliendo funciones de captación de sedimentos y escorrentía, proporcionan una evacuación ordenada de esta. Por último, ofrecen también una función de protección frente a la llegada de escorrentía desordenada. En el caso del presente proyecto, se ubican 2 zanjas bajo el gran talud que ocupa la zona central de la zona de actuación, con idea de envolverlo y atrapar la escorrentía y sedimentos provenientes de este.

La sección de las zanjas es variable, **viniendo definida por el caudal de eventos de precipitación a periodos de retorno de 100 años en la zona a implementar.**

Apertura de cunetas

Esta medida se utiliza para salvaguardar los caminos, proteger zonas de llegada de escorrentía a alta velocidad y evacuar el agua de manera ordenada.

Al igual que para los encauzamientos, el diseño y dimensionado de las cunetas se realiza a partir del cálculo del caudal de diseño mediante el “método racional”. Este método supone la generación de una escorrentía en una determinada cuenca a partir de una intensidad de precipitación uniforme en el tiempo sobre toda su superficie. Los cálculos y estudios realizados para el correcto dimensionado de las cunetas tipo.

La protección de las cunetas comprende el uso de hormigón, además de geotextiles, según se estime necesario en cada actuación.

Por último, las cunetas pueden ir acompañadas de caballones, rastrillos y arquetas según necesidades específicas.

Badenes

Badenes hormigonados en puntos donde se acumula las aguas provenientes de las distintas subcuencas antes de llegar a la salida natural de las aguas.

El objeto del badén es proteger al camino ante la llegada de una gran cantidad de escorrentía proveniente de cotas superiores y, en segundo lugar, favorecer la llegada de estas escorrentías a la rambla dando forma al badén para que conduzca las aguas a su salida natural.

Estará formado por una losa de 15 cm de hormigón armado tipo HA-25 sufloresistente, mezclado con árido de 40 o 20mm de tamaño máximo. En cuanto al armado, se colocará en obra, y estará formado por mallas electrosoldadas de acero, de 8mm de diámetro y retícula de 20x20 cm.

b. Obras transversales a cauces

Este conjunto de medidas comprende la construcción de obstáculos perpendiculares a la dirección de la escorrentía con el objetivo de disminuir su velocidad, además de ofrecer el control de los posibles sedimentos producidos en cuenca o subcuenca.

Albarrada

Esta solución se proyecta principalmente en cauces sobre los que previamente se ha realizado un acondicionamiento de sección, con la función de reforzar y estabilizar esta. También pueden aplicarse sobre cauces naturales o cárcavas, para de nuevo, reforzar los mismos y evitar su ensanchamiento. Por último, una vez se colmaten, se conseguiría la pendiente de compensación y la estabilización total del cauce, en el futuro es de esperar que la vegetación colonice el cauce desarrollándose sobre estos sedimentos.

Se trata de un muro u obstáculo perpendicular al cauce formado por piedras de escollera superpuestas sin argamasa. En una secuencia de obstáculos consecutivos, se recomienda que el centro de la coronación de la albarrada situada aguas abajo se halle al mismo nivel que el centro del pie de la estructura inmediata aguas arriba.

Cuando la sección del cauce no se encuentre protegida mediante encachado de piedra, todas las albarradas irán seguidas de un **disipador de energía** compuesto por rocas y hormigón ciclópeo, el cual complementará y potenciará sus funciones. La función de este elemento es disminuir la velocidad y evitar la erosión aguas debajo de la albarrada.

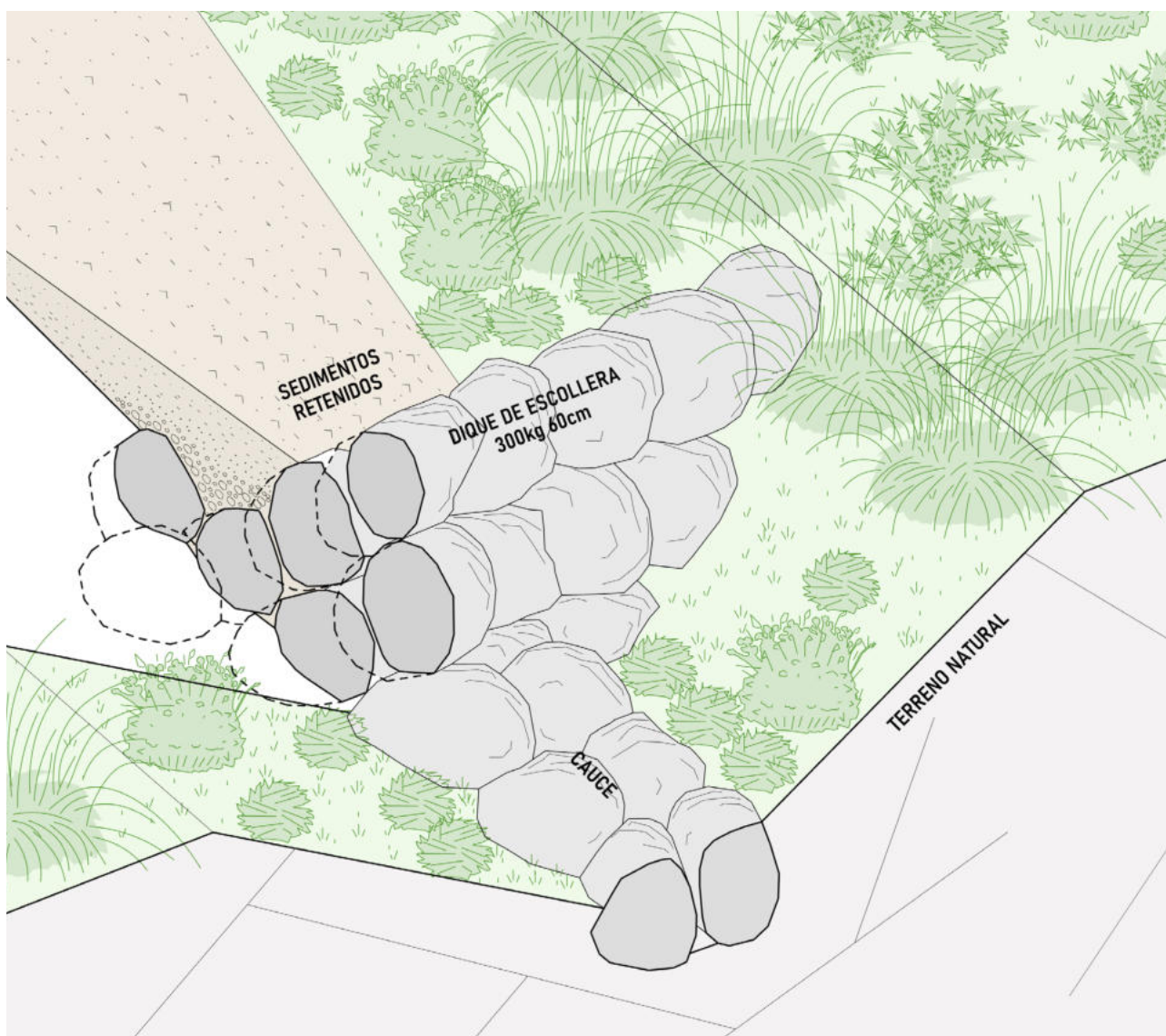


Figura 7. Albarrada.

Diques

Se trata de estructuras transversales al cauce. Fundamentalmente, buscan dar respuesta a diversos problemas asociados a la erosión del entorno y a la retención de caudales sólidos.

Estas estructuras provocan la interrupción de la escorrentía, reteniendo aguas arriba el caudal con los sedimentos que transporta y facilitando el depósito de los mismos. Durante el tiempo en el que dicho almacenamiento no se colmata, el efecto presa que provoca hace que las aguas embalsadas reduzcan su velocidad, dando lugar a que se depositen los elementos más gruesos en el fondo. Los sedimentos que se acumulan progresivamente van elevando la cota del lecho del cauce hasta alcanzar la pendiente de compensación, menor que la del cauce natural.

Estos diques se han clasificado según el material de construcción utilizado en:

- Diques de escollera.
- Diques de mampostería hidráulica, con y sin mechinales.
- Diques de gaviones.

Todos los diques irán seguidos de un dissipador de energía compuesto por rocas y hormigón ciclópeo, el cual complementará y potenciará las funciones de los diques.

Dique de mampostería hidráulica con mechinales

Dique que consiste en un muro de rocas unidas por cemento (mampostería hidráulica) colocado perpendicularmente a la dirección de escorrentía. Este va

acompañado de mechinales, elementos de drenaje ubicados en la pared del dique y dissipador de energía en su parte inferior, formado por un encachado de escollera.

Rastrillos

Se trata de obstáculos de pequeña entidad, perpendiculares al cauce y realizados mediante mampostería. Las funciones atribuidas a estas obras son la reducción de la velocidad del agua y la captación de sedimentos mediante la creación de discontinuidades tales como piedras. Este tipo de solución se proyecta en cauces de mediana entidad y con revestimiento.

Actuaciones de restauración del paisaje forestal y su integración paisajística

Actuaciones enfocadas a la regeneración de la cubierta vegetal de la superficie de actuación. Una vez esta se desarrolle, se disminuirá la producción de sedimentos al reducir la escorrentía y aumentará la capacidad de infiltración de los suelos de la Sierra Minera, además de potenciar la biodiversidad en esta.

Por último, otro de los objetivos de la regeneración vegetal es conseguir la integración paisajística de todas las actuaciones.

Implantación de la cubierta vegetal

La implantación de la cubierta vegetal se divide en plantaciones y siembras.

Las plantaciones se llevan cabo de manera manual y se reservan para las especies arbóreas y arbustivas. Las tareas necesarias para llevar a cabo las plantaciones se resumen a continuación:

- **Ahoyado manual:** El tamaño de los hoyos vendrá determinado por el cepellón siendo el tamaño tipo de hasta 40x40x40 cm
- **Plantación manual** con plantas de invernadero dispuestas en bandejas
- **Construcción de alcorque:** Construido con tierra vegetal exterior aportada, consiste en realizar un pequeño muro alrededor de la planta con unas dimensiones de 55 cm de diámetro, 15 cm de altura y 10 cm de anchura, como medidas aproximadas.

- **Tutores de madera y protección mediante malla anti roedores biodegradable,** fabricada la malla a base de almidón u otros materiales biodegradables que cumplan la función de protección proyectada. Se incluirán 2 tutores, para la estabilización y anclaje de esta, descartándose tutores para la guía de las plantas. Tanto la malla como los tutores irán anclados al suelo mediante excavación.
- **Riegos:** A razón de 20 litros por pie, se plantean cuatro riegos: 1 de plantación y 3 de mantenimiento. Se riega mediante manguera en los alcorques, de cada pie, el volumen señalado.

La reposición de marras se realizará de forma manual con un porcentaje de marras admisibles del 20%. Incluye riego de establecimiento.

En cuanto a la siembra, se reserva únicamente para especies herbáceas y se contemplan tanto las siembras manuales como mecanizadas, dependiendo de las pendientes de trabajo. Para las zonas de llanura, cima, plataforma de berma y taludes de pendiente de pendiente menor o igual a 1V:3H, se llevará a cabo la ejecución mecanizada de la siembra mediante tractor neumático con un equipo de siembra acoplado, el cual de manera directa y con un simple tratamiento realizará la escarificación del terreno, la siembra según la dosis programada y la posterior remoción para el enterrado de la semilla.

Mientras que, en taludes y zonas con pendiente igual o superior a 1V:2H, la ejecución de la tarea de siembra será manual, para su ejecución se realizará una pequeña remoción previa del terreno con ayuda de un rastrillo manual. Posteriormente, se distribuirá la semilla de forma aleatoria por toda la zona y para finalizar se realizará otra remoción del terreno con rastrillo para su enterrado.

Restauración pasiva

Se planea en zonas con vegetación establecida como pastizales, especies arbustivas o de arbolado, etc. O bien, zonas con imposibilidad de acceso. El objetivo de esta técnica es preservar y regenerar ecosistemas que tienen un nivel de degradación menor.

La restauración pasiva consiste en tratamientos silvícolas (si aplica), completándose con la eliminación de especies exóticas invasoras, donde se mantiene el arbolado y la vegetación presente, estas áreas o

zonas actualmente funcionan como sumideros de carbono. Se consideran también podas al arbolado.

Algunos taludes de origen antrópico, debido a sus características de altura o difícil acceso se han incluido en las zonas de restauración pasiva, para estos, se

plantea una medida adicional, denominada **“Creación de puntos de vegetación en taludes”**, esta medida o actuación consiste en excavar directamente sobre los taludes, creando pequeñas planicies que son rellenas con tierra vegetal con un espesor de 30 cm, realizando la siembra y plantación sobre estos.

3.3.3. Descripción de las obras proyectadas en las zonas de actuación

Una vez definidas las soluciones adoptadas, estas se estudian caso por caso para cada zona de actuación y se desglosan en todos los tipos de técnicas necesarias para la ejecución de las obras.

Para facilitar su definición espacial en los proyectos, se engloban en tres grupos de actuaciones:

- **Actuaciones lineales** (diques, encauzamientos, muros de gaviones, adecuación de caminos, etc.)
- **Actuaciones poligonales** (tratamientos tipo encalante, plantaciones, actuaciones sobre IRMAs)
- **Movimientos de tierras** (retaluzados, apertura de bermas, subsolados, etc.)

Zona de actuación 1 - Santa Lucía

La zona 1 comprende el límite noroeste de la restauración hidrológico forestal. Al este de la zona 1 se si-

túan los depósitos mineros (IRMA) de “Los Pajarillos” y “Marqués de Péjar”.



Figura 8. Situación Zona de actuación 1 - Santa Lucía.

La situación actual de los terrenos es la siguiente:

- Al norte, zona dominada por pastizales y algunos ejemplares puntuales de especies de matorral y *Pinus halepensis*. En la zona central, se describe una terrera producto de la excavación de un pozo y unos pequeños taludes con un grado de degradación menor, junto a estos dos procesos erosivos, se describe una cárcava en el este de la zona de trabajo, por último, un poco más al este de la cárcava descrita y ya en el extremo de

la zona de actuación, se describen 2 pequeñas acumulaciones de residuos mineros abandonados.

- Al sur de la carretera, se aprecia una mayor heterogeneidad, siendo la zona este de similares características a la zona descrita anteriormente a excepción de la presencia de residuos mineros y cárcavas. En el sur se encuentra una zona de grandes taludes artificiales, producto de la acumulación de restos mineros, mostrando una mayor o menor degradación dependiendo de la naturaleza de estos.

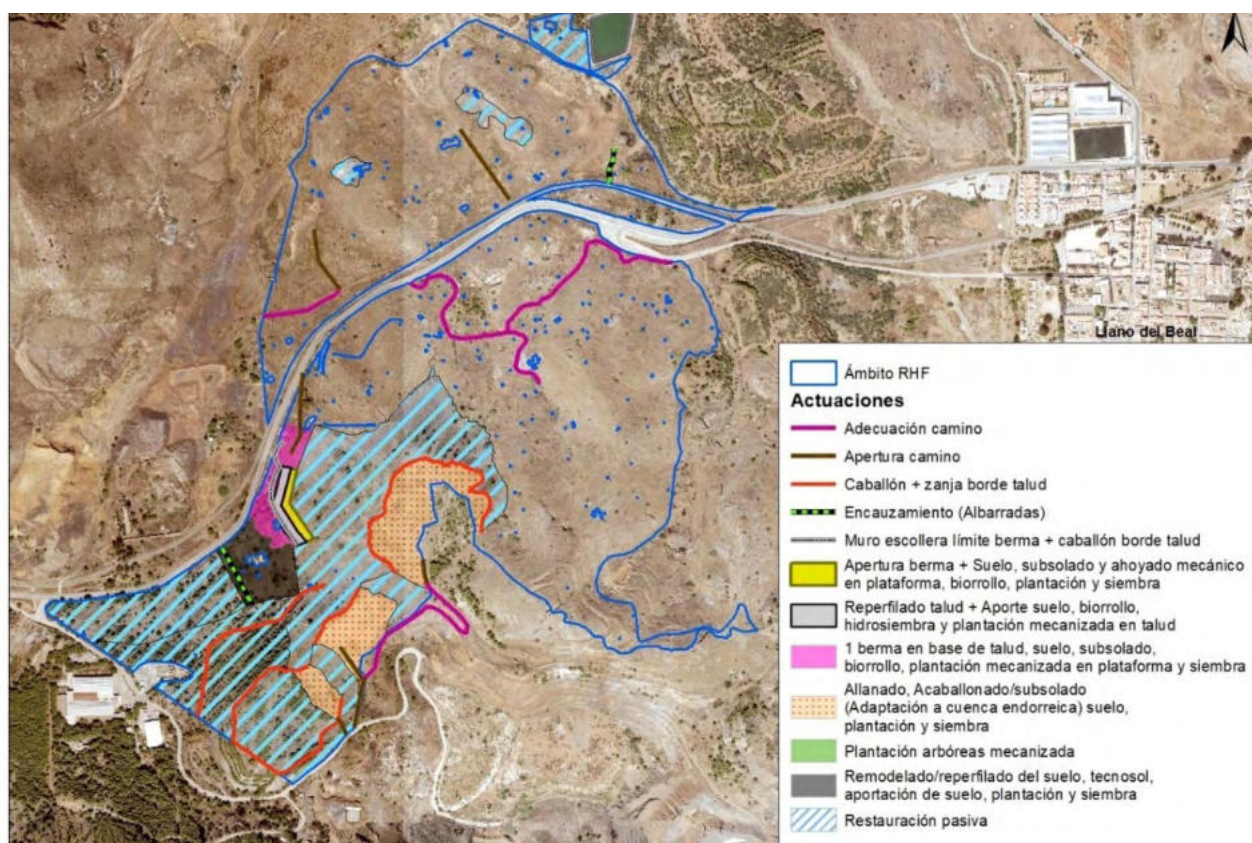


Figura 9. Actuaciones en la Zona 1 - Santa Lucía.

A continuación, se describen los tratamientos y actuaciones previstos para la zona 1.

Entre las diversas **actuaciones lineales**:

- Actuación sobre las dos cárcavas identificadas mediante la adecuación del cauce y la construcción de albarradas a modo de diques.
- Adecuación de los caminos existentes y creación de aquellos que sean necesarios para realizar repoblaciones. Por último, destacan las obras de protección de taludes como las zanjas, caballones y los muros de escollera, estas actuaciones se ubican en los bordes de

los taludes con el objetivo de estabilizar estos y mitigar la escorrentía y producción de sedimentos.

En cuanto a las **actuaciones poligonales**:

- Plantación mediante ahoyado mecánico en la superficie central de la zona de trabajo, fuera de las terreras y taludes.
- Movimientos de tierras en la parte superior de los taludes, para crear condiciones de plataforma 'a contrapendiente', se aportará tierra vegetal y se realizarán plantaciones mecanizadas y siembras.

- Actuación sobre una IRMA. Existe una llanura entre la carretera y el comienzo de estos taludes, donde se ha identificado una IRMA en la que se realizarán labores de remodelado del terreno para crear una plataforma en la que aplicar el tratamiento encalante y posteriormente realizar la pertinente plantación mecanizada y siembra.

En cuanto a los Movimientos de tierras, se busca mejorar la estabilidad en el talud para el establecimiento de la vegetación. Para ello, se abrirá una berma en la base del talud de mayor entidad, además, se

proponen actuaciones tanto en la plataforma creada como en el talud inferior.

Estas actuaciones se acompañan con **elementos de protección contra la erosión y estabilización de taludes** como pueden ser los biorrollos las Fajinas y el Mulching

Las siembras y plantaciones además de cumplir una labor de control de la erosión, tienen el objetivo de “naturalizar” e incluir los taludes en el entorno.

Las actuaciones se resumen en la siguiente tabla:

ACTUACIONES LINEALES	METROS (M)		
Encauzamiento (Con diques de albarradas)	196,05		
Adecuación y apertura de caminos	2.246,25		
Caballón + zanja borde talud	1.725,56		
Muro escollera límite berma + caballón borde talud	230,34		
ACTUACIONES POLIGONALES	HECTÁREAS (HA)		
Allanado, Acaballonado/subsolado (Adaptación a cuenca endorreica) suelo y plantación y siembra	4,74		
Restauración pasiva	23,75		
Plantación arbóreas y matorrales manual	60,94		
Remodelado/reperfilado del suelo, tratamiento encalante, aportación de suelo, plantación y siembra	1,72		
MOVIMIENTO DE TIERRAS EN TALUD	SUPERFICIE (M ²)	PROFUNDIDAD MEDIA (M)	VOLUMEN (M ³)
Apertura berma + Aporte de suelo, subsolado y ahoyado mecánico en plataforma, instalación de biorrollos, plantación y siembra	1.075,21	6,00	6.451,26
Reperfilado talud + Aporte de suelo, Instalación de biorrollos, hidrosiembra y plantación mecanizada en talud	3.308,85	1,50	4.963,28

Tabla 2. Resumen de actuaciones en zona 1.

Zona de actuación 2 - Ocasión

Esta zona ocupa la margen izquierda de la zona central de la rambla del Beal, zona de gran extensión con alta variabilidad de necesidades y tratamientos para su restauración.

Las cinco situaciones más notables son:

- Grandes extensiones de suelo con propiedades edáficas empobrecidas en llanura.
- Grandes taludes en condiciones de severa degradación.
- Daños por escorrentía en forma de grandes cárcavas.
- Presencia de una IRMA.
- Zonas con menor degradación que están ocupadas por herbáceas y ejemplares espontáneos y baja densidad de otras especies, como matorrales y *Pinus halepensis*.



Figura 10. Situaci3n Zona de actuaci3n 2 - Ocasi3n.

Para cumplir con los objetivos del proyecto en esta zona de actuaci3n 2, se proponen las actuaciones que se describe a continuaci3n.

Actuaciones lineales, entre las que destacan las obras hidr3ulicas para proteger la zona ante la escorrentía: caballones y zanjas en los bordes de talud, encauzamientos mediante encachado de piedra, diques de diversa naturaleza seg3n necesidades y cunetas revestidas de hormig3n. Estas 3ltimas tienen como funci3n la de proteger la zona de actuaci3n de la llegada incontrolada de escorrentía a gran velocidad. Adem3s de esto, ser3 necesario la apertura y adecuaci3n de caminos y la instalaci3n de un paso de aguas.

Respecto a las **actuaciones poligonales** de mayor entidad, se realizar3n en las llanuras de tierras degradadas, ya que requieren de allanado o acondicionado del suelo, aporte de tierra vegetal de origen exterior, subsolado, para crear condiciones a contra pendiente, y plantaci3n mecanizada y siembras.

- En las IRMAs que se encuentran al norte y noroeste de la zona se incluir3 tratamiento tipo encalante, adem3s de en estas zonas, se aplicar3 tratamiento tipo encalante en el 3rea circundante al n3cleo urbano del Llano del Beal.

- Destaca tambi3n, la extensa zona de plantaci3n mecanizada que se realizar3 en el centro de la zona y el 3rea de “restauraci3n pasiva”, que ocupar3 los taludes de mayor entidad donde no es t3cnicamente viable trabajar.

En relaci3n a los **movimientos de tierras**, se hacen precisos en taludes que requieren apertura de bermas y/o reperfilados, adem3s de tratamientos como pueden ser el aporte de tierra vegetal, instalaci3n de biorrollos, plantaci3n mecanizada e hidrosiembra. S3lo se instalar3n escolleras en pie de talud sobre aquellos de mayor entidad. En el valle central de la Zona 2, ser3 necesario colapsar y tumbar el talud ubicado bajo la carretera que cruza la zona de este a oeste, dado que se encuentra muy degradado por la acci3n hídrica (se describen grandes c3rcavas y otros procesos erosivos), tras esta actuaci3n, se le dar3 una pendiente uniforme y se aplicar3n sobre el nuevo talud los tratamientos habituales descritos anteriormente para el resto de movimientos de tierras en la zona.

Para mayor detalle y ubicaci3n de cada actuaci3n, se incluye ilustraci3n y tabla resumen:

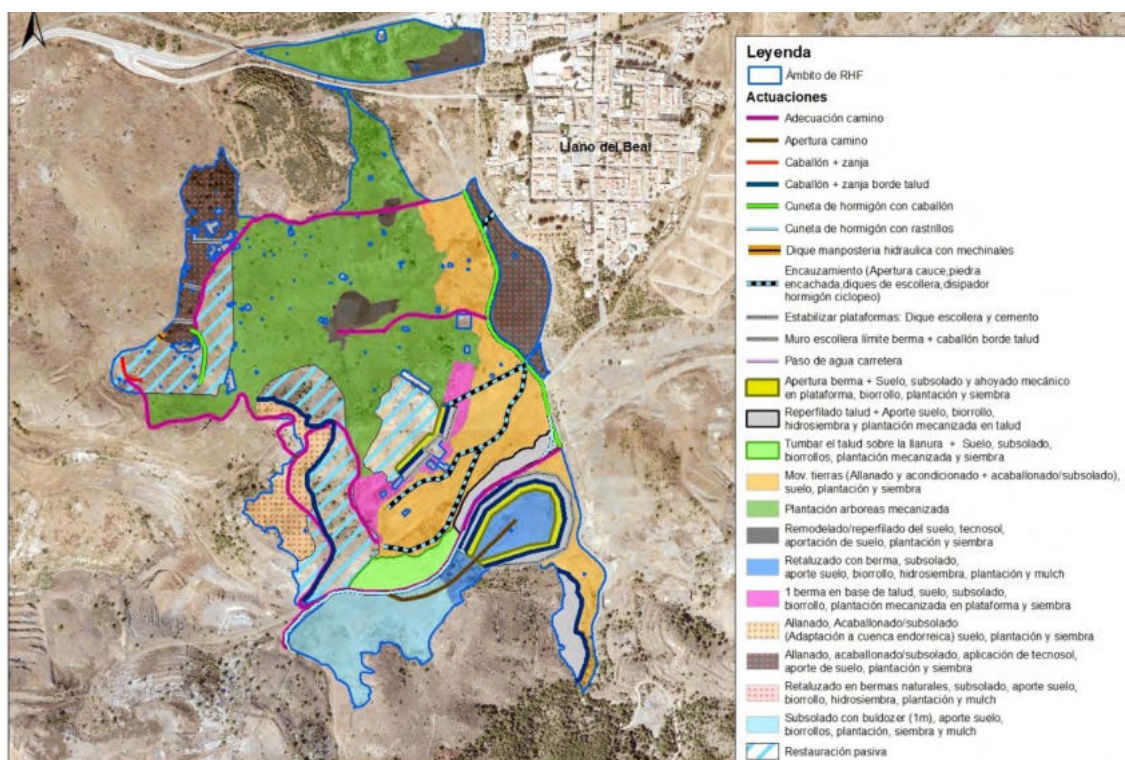


Figura 11. Actuaciones en la Zona 2 - Ocación.

ACTUACIONES LINEALES	METROS (M)		
Caballón + zanja borde talud	1.985,83		
1 Dique mampostería hidráulica con mechinales	No aplica		
3 Diques mampostería hidráulica sin mechinales	No aplica		
Encauzamiento (Apertura cauce y encachado de piedra)	1.060,15		
35 Diques de escollera con dissipador de energía de hormigón ciclópeo	No aplica		
Muro escollera limite berma + caballón borde talud	690,30		
1 Paso de agua carretera	7,17		
ACTUACIONES POLIGONALES	HECTÁREAS (HA)		
Allanado y acondicionado del terreno, aportación de tierra vegetal, acaballonado/subsolado, plantación mecanizada y siembras	19,47		
Restauración pasiva	11,57		
Plantación de especies arbóreas mecanizada	23,66		
Remodelado/reperfilado del suelo, aplicación tratamiento encalante, aportación de tierra vegetal, plantación mecanizada y siembra	8,15		
MOVIMIENTO DE TIERRAS EN TALUD	SUPERFICIE (M²)	PROFUNDIDAD MEDIA (M)	VOLUMEN (M³)
Apertura berma, aporte de tierra vegetal, subsolado en plataforma, instalación de biorrollos, plantación mecanizada y siembras	12.340,03	6	74.040,18
Reperfilado talud, aporte de tierra vegetal, instalación de biorrollos, hidrosiembra y plantación mecanizada en talud	26.084,15	2,60	71.908,42
Tumbar el talud sobre la llanura, subsolado, aporte de tierra vegetal, instalación de biorrollos, plantación mecanizada y siembras	14.247,01	6	85.482,06

Tabla 3. Resumen de actuaciones en zona 2.

Zona de actuación 3 - El Porvenir

Esta zona se ubica en la margen derecha de la rambla del Beal, las afecciones y necesidades encontradas son muy similares a las encontradas en la

zona 2, con la diferencia de que en esta zona no se observa ninguna instalación de residuos mineros abandonados.

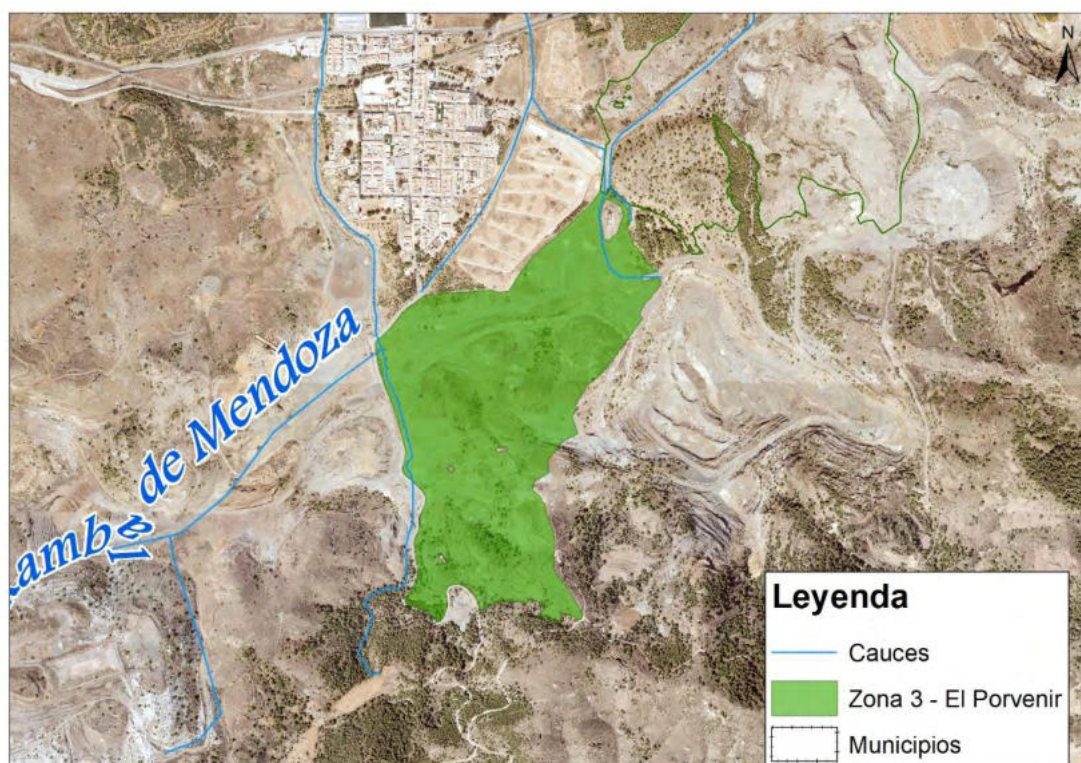


Figura 12. Situación Zona de actuación 3 – El Porvenir.

Las obras y actuaciones proyectadas para esta zona se describen a continuación.

Se realizarán numerosas **obras lineales** de tipo hidráulico como son caballones, encauzamientos de piedra encachada, acequias, cunetas y diques de diversa naturaleza.

Respecto las **obras poligonales**, principalmente, se realizarán tratamientos sobre las llanuras de tierras degradadas. En estas, se proyecta el allanado y acondicionamiento de la superficie, aporte de tierra vegetal, acaballonado/subsolado para crear condiciones a contrapendiente, plantación mecanizada y siembras, además de estos tratamientos, se aplicará tratamiento tipo encalante en la zona

circundante al núcleo urbano del Llano del Beal. Las zonas de “restauración pasiva” en este caso, se deben a la imposibilidad de acceso y al bajo nivel de degradación en el que se encuentra la zona.

Destaca la gran cantidad de **movimientos de tierra en talud** a realizar, como reperfilado, reconstrucción de taludes y apertura de bermas, entre otras. Además de los tratamientos descritos, se reconstruirá una mota de tierra de protección hidráulica que se encuentra actualmente severamente dañada. Estas actuaciones se acompañan con **elementos de protección contra la erosión y estabilización de taludes** como pueden ser los biorrollos las Fajinas y el Mulching.

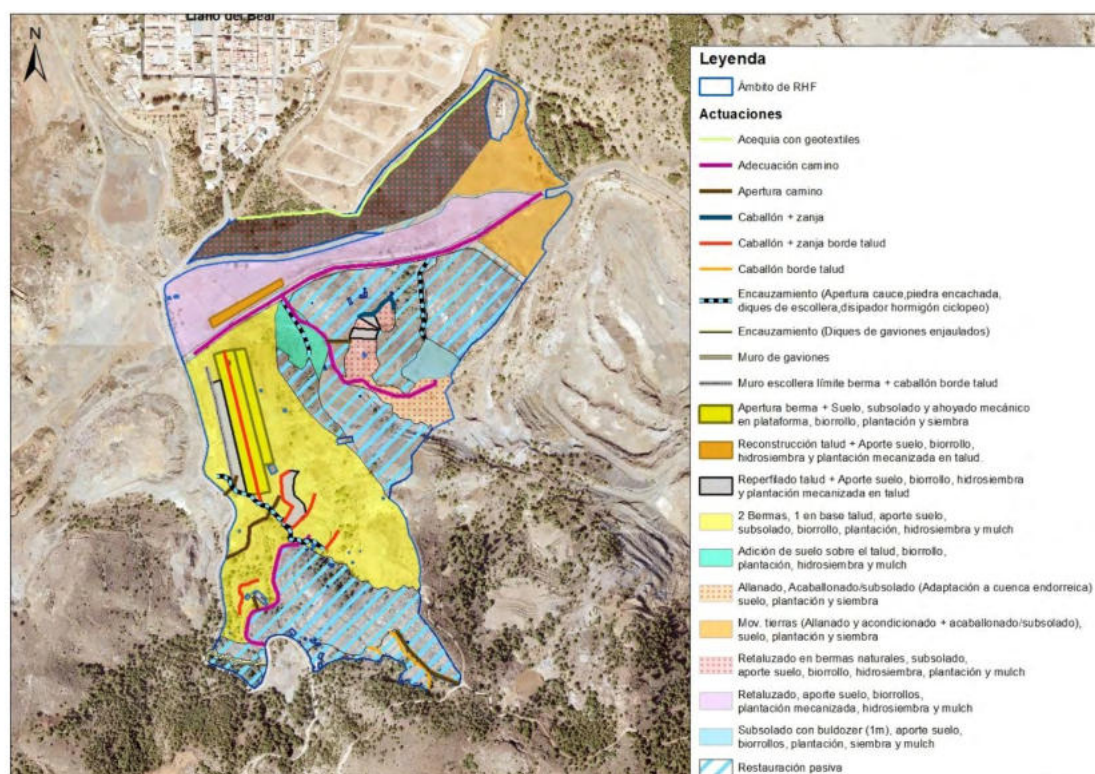


Figura 13. Actuaciones en la zona 3 – El Porvenir.

ACTUACIONES LINEALES	METROS (M)
Adecuación y apertura de caminos	1.877,55
Caballón + zanja	913,97
Cuneta/Acequia	588,35
2 Diques de gaviones	No aplica
Muro de gaviones	21,69
Muro escollera límite berma + caballón borde talud	234,64
Encauzamiento (Apertura de cauce y encachado de piedra)	562,80
Dique de escollera con dissipador de energía de hormigón ciclópeo	No aplica
ACTUACIONES POLIGONALES	HECTÁREAS (HA)
Adición de suelo sobre el talud, biorrollo, plantación, hidrosiembra y mulch	0,84
Allanado y acondicionado del terreno, aportación de tierra vegetal, acaballonado/subsolado, plantación mecanizada y siembras	3,99
Allanado, acaballonado/subsolado, tratamiento tipo encalante, aporte de suelo, plantación y siembra	4,56
Restauración pasiva	16,46
Subsolado con bulldócer, aporte de tierra vegetal, instalación de biorrollos, plantación mecanizada, siembras y mulch	0,51

MOVIMIENTO DE TIERRAS EN TALUD	SUPERFICIE (M ²)	PROFUNDIDAD MEDIA (M)	VOLUMEN (M ³)
Apertura berma, aporte de tierra vegetal, subsolado en plataforma, instalación de biorrollos, plantación mecanizada y siembras	15.120,10	6,00	90.720,60
Reperfilado talud, aporte de tierra vegetal, instalación de biorrollos, hidrosiembra y plantación mecanizada en talud	9.681,9	5,88	23.873,09

Tabla 4. Resumen de actuaciones en zona 3.

Zona de actuación 4 - La Reservada

En esta zona se pueden observar grandes taludes artificiales, comprendidos entre la balsa minera restaurada "Jenny" y el área de los Blancos. En la mayoría de

los taludes no es técnicamente viable trabajar.

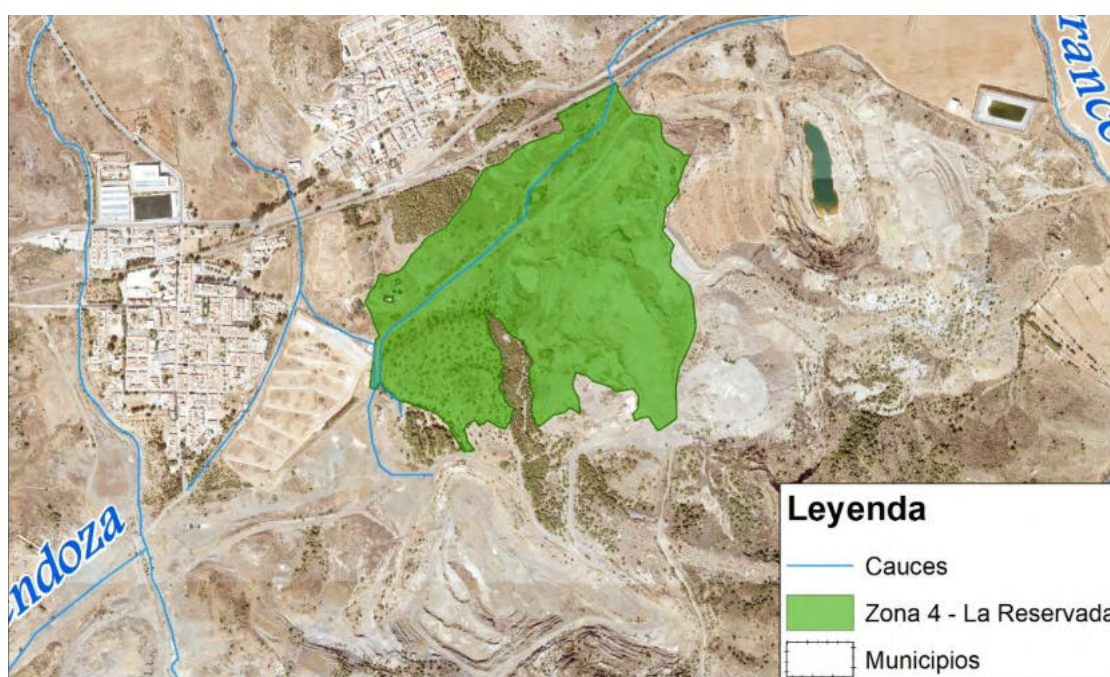


Figura 14. Situación Zona de actuación 4 – La Reservada.

Es por ello, que las **actuaciones poligonales** se centran en la restauración de las zonas llanas de los taludes para controlar la producción de sedimentos, además de suavizar el impacto de estos en el paisaje. El tratamiento en estas zonas comprenderá un acondicionado/allanado del terreno, aporte de tierra vegetal, subsolado, siembra y plantación.

También se ubican IRMA en el extremo oeste, donde se aplicarán los mismos tratamientos descritos anteriormente y, adicionalmente, se incluyen el tratamiento tipo encalante.

La parte suroeste tiene un estado de degradación menor, por ello se plantea la "restauración pasiva" en esta zona.

Por último, se describe una zona a repoblar con arbolado y matorral mediante medios mecánicos en el extremo norte de la zona de actuación.

Como **actuaciones lineales** destacan los caminos a abrir/adecuar y las unidades de caballón más zanja en los bordes y pie de talud.

No se plantean actuaciones de tipo **movimientos de tierra en talud**.

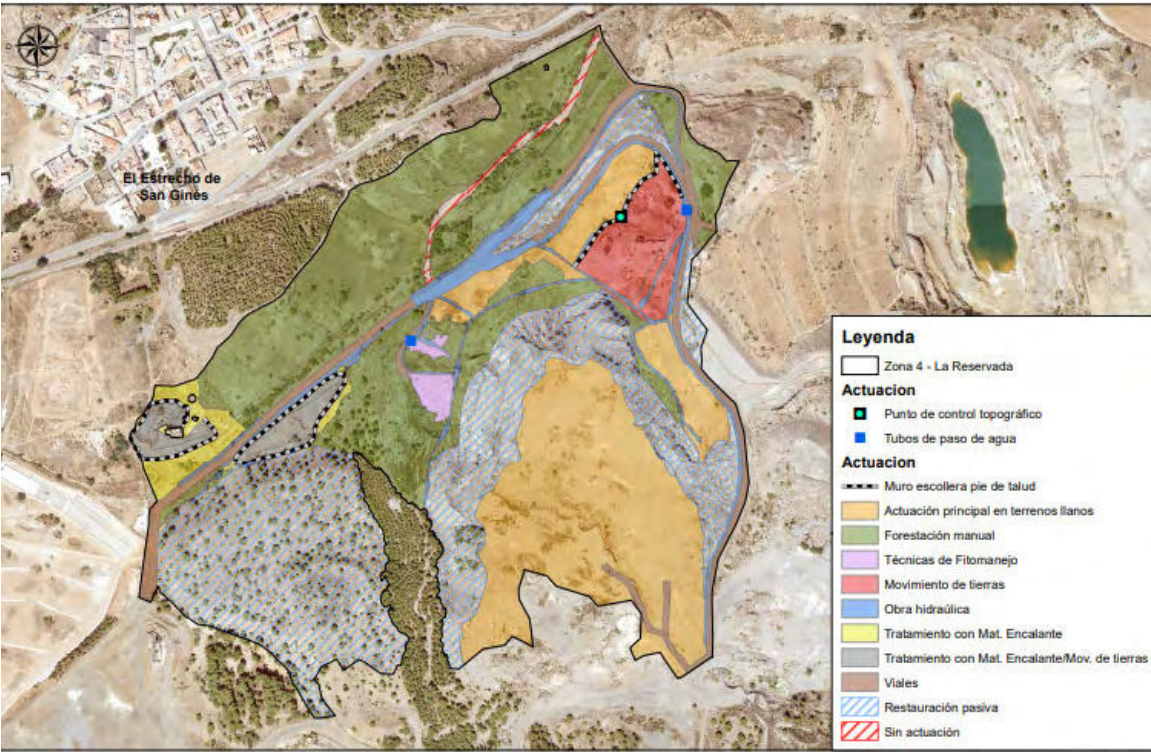


Figura 15. Resumen de actuaciones en zona 4.

ACTUACIONES LINEALES		METROS (M)		
Adecuación y apertura de caminos		1.695,19		
Caballón + zanja en borde de talud		1.669,45		
Muro de escollera		109,33		
ACTUACIONES POLIGONALES		HECTÁREAS (HA)		
Allanado y acondicionado del terreno, aportación de tierra vegetal, acaballonado/subsolado, plantación mecanizada y siembras		24,40		
Remodelado/reperfilado del suelo, tratamiento tipo encalante, aportación de tierra vegetal, plantación mecanizada y siembra		2,58		
Restauración pasiva		14,85		
Plantación arbóreas mecanizada		6,21		
MOVIMIENTO DE TIERRAS EN TALUD		SUPERFICIE (M²)	PROFUNDIDAD MEDIA (M)	VOLUMEN (M³)
No aplica				

Tabla 5. Resumen de actuaciones en zona 4.

Zona de actuación 5 - La Rosa

Esta zona comprende el extremo Sur del área de restauración, ubicándose al sur de la Peña del Águila y

colindando con el Parque Regional de Calblanque, Monte de las Cenizas y Peña del Águila.

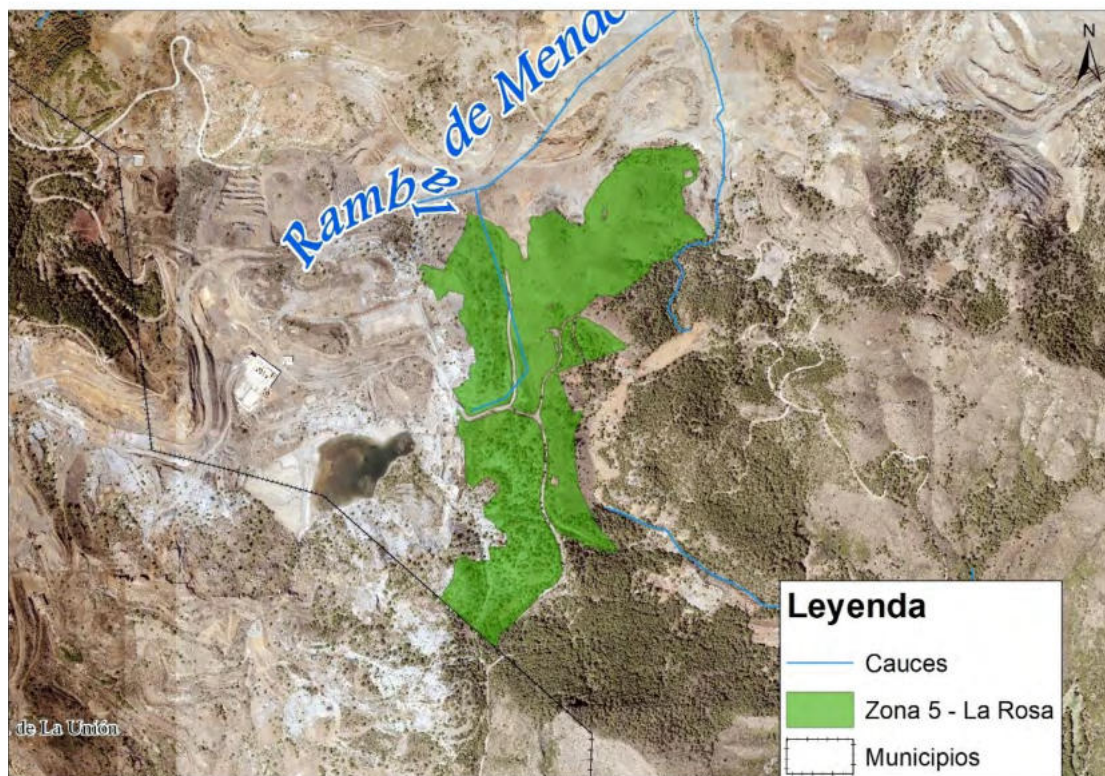


Figura 16. Situación Zona de actuación 5 – La Rosa.

El aspecto que singulariza esta zona es el gran talud de la IRMA Pantano de La Rosa, donde no es posible trabajar directamente, por ello se plantean **actuaciones poligonales** sobre el borde y su plataforma superior. Se propone realizar movimiento de tierras para allanar los residuos ubicados en la plataforma, tratamiento tipo encalante y fitoestabilización. Existen otras IRMA de menor entidad en esta zona, para las que se proponen las mismas actuaciones.

En los taludes del norte de la zona, se propone **movimiento de tierras** en la zona llana inferior y meseta superior de estos (acondicionado de las llanu-

ras para crear pequeñas cuencas endorreicas), con posterior cubrimiento con tierra vegetal, siembra y plantación. Las laderas se encuentran parcialmente pobladas por *Pinus halepensis* y no se va actuar sobre ellas.

En cuanto a las **actuaciones lineales**, se proyecta la apertura de caminos y obras de protección hidráulica como la formación de una cuneta con rastrillos recubierta de hormigón, un paso de aguas y caballos con zanja.

No se plantean actuaciones de tipo **movimientos de tierra en talud**.

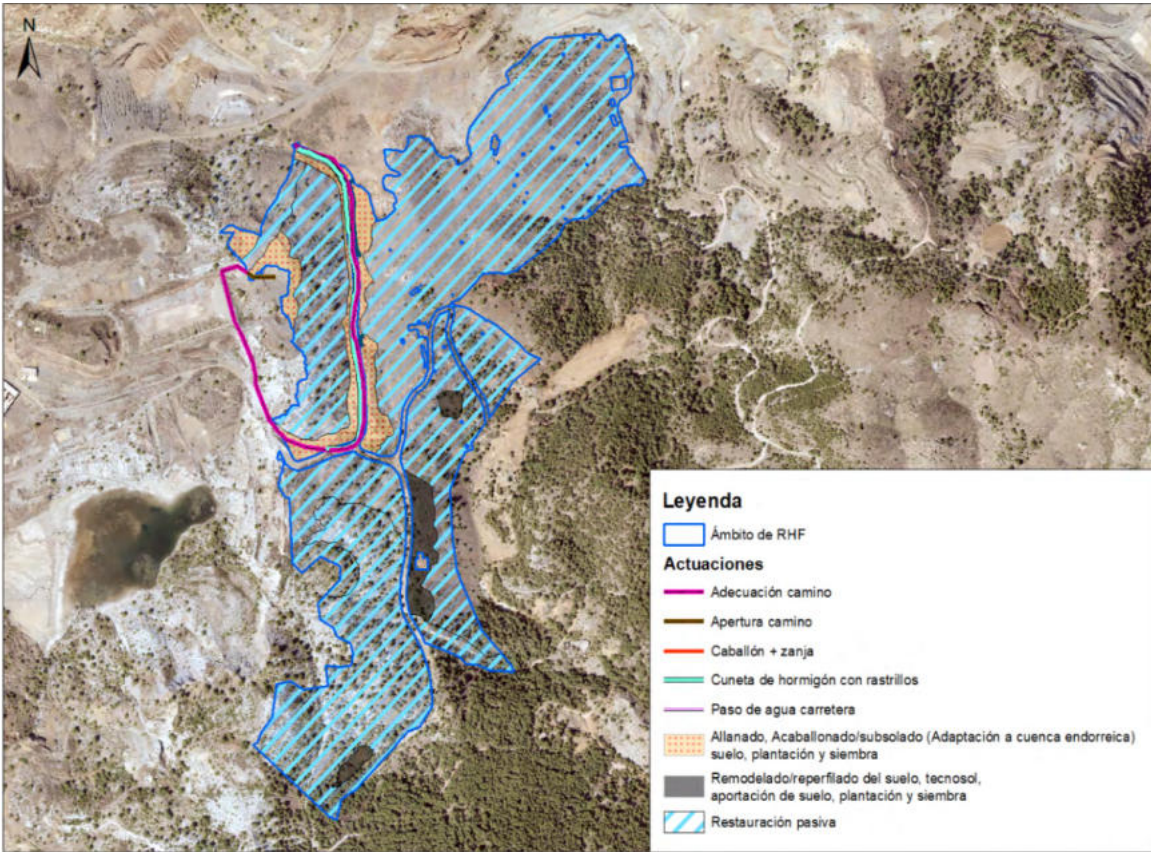


Figura 17. Resumen de actuaciones en zona 5.

ACTUACIONES LINEALES		METROS (M)		
Adecuación y apertura de caminos		1.110,85		
Caballón + zanja		162,63		
Cuneta con rastrillos recubierta de hormigón		603,87		
Paso de agua carretera		6,82		
ACTUACIONES POLIGONALES		HECTÁREAS (HA)		
Allanado y acondicionado del terreno, aportación de tierra vegetal, acaballonado/subsolado, plantación mecanizada y siembras		2,83		
Remodelado/reperfilado del suelo, tratamiento tipo encalante, aportación de tierra vegetal, plantación mecanizada y siembra		1,28		
Restauración pasiva		35,19		
MOVIMIENTO DE TIERRAS EN TALUD		SUPERFICIE (M²)	PROFUNDIDAD MEDIA (M)	VOLUMEN (M³)
No aplica				

Tabla 6. Resumen de actuaciones en zona 5.

6. Zona de actuación 6 - Los Blancos

Zona de gran extensión (132,90 ha), ubicada en el extremo este de la restauración hidrológica forestal y se encuentra formada, principalmente, por tres unidades:

- Zona de gran talud, que rodea la corta minera de los Blancos III (al norte).
- Zona central, la cual muestra una buena cobertura de vegetación y estado de regeneración, donde se realizará una restauración pasiva.
- Zona sur, donde se encuentra una zona de grandes canchales que cubren laderas enteras, de elevadas pendientes.

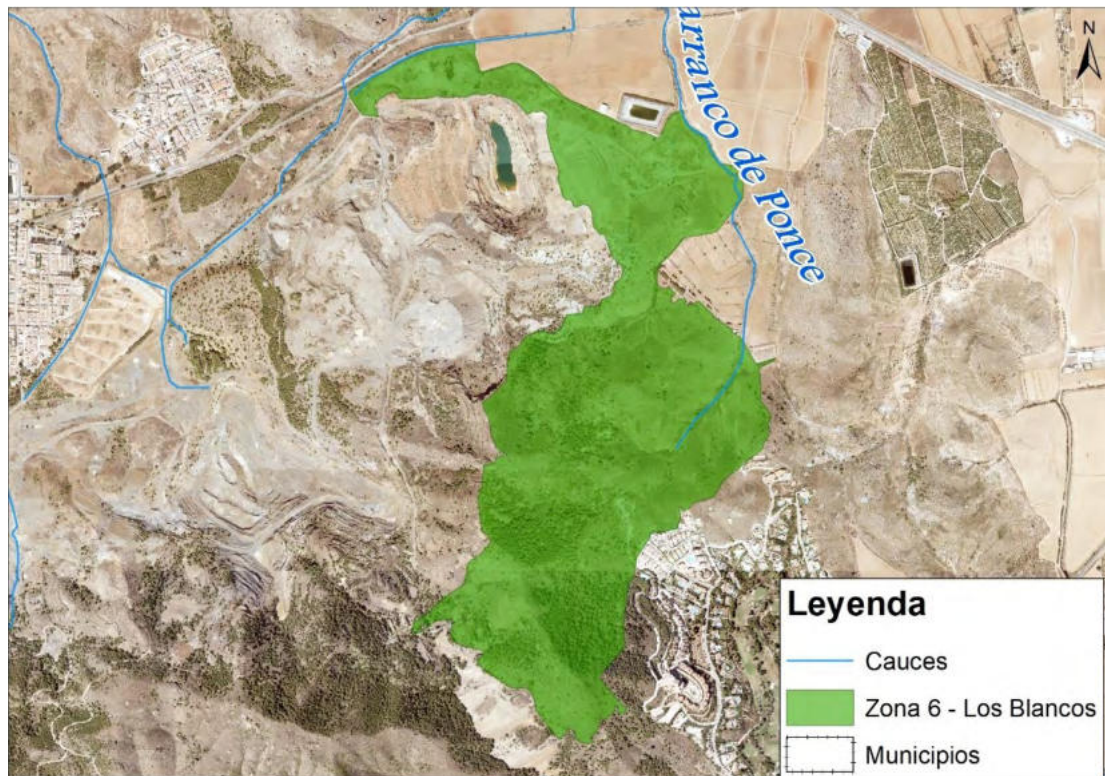


Figura 18. Situación Zona de actuación 6 – Los Blancos.

Dadas las grandes dificultades técnicas que supone actuar sobre esta zona y el bajo impacto que tendrían las potenciales actuaciones, se realizará la restauración pasiva en la zona central y sur.

Entre las **actuaciones lineales**, destaca el caballón y zanja que rodeará al gran talud del norte, aislándolo y creando condiciones endorreicas, con el objetivo de atrapar cualquier sedimento producido. Este será conectado con una cuneta de hormigón, con la idea de descargar el excedente de escorrentía a la rambla de Ponce. También se pretende abrir y acondicionar caminos.

En cuanto a las **actuaciones poligonales**, destaca la gran extensión de restauración pasiva del sur. Se prevé realizar trabajos de adecuación de tierras en las zonas más degradadas del extremo norte y reforestaciones en torno al gran talud, con la idea de aislarlo para atrapar cualquier sedimento producido y disminuir su impacto visual, incluyéndolo en el paisaje forestal.

No se plantean actuaciones de tipo **movimientos de tierra en talud**.

3.4. Aplicación de soluciones al Dominio Público Hidráulico (ramblas mineras)

AUTORES: Carmen M. Martínez-Saura. TRAGSATEC. Tecnologías y Servicios Agrarios, S.A., S.M.E., M.P. Eduardo Lafuente Sacristán. Comisaría de Aguas. Confederación Hidrográfica del Segura O.A.

3.4.1. Introducción

Los cauces temporales aportan heterogeneidad ambiental, son refugio para la biodiversidad, actúan como conectores entre paisajes, participan en la reducción de riesgos y son una fuente de recursos naturales (Cariñanos, 2010; Sánchez-Escolano y Toro, 2020). A pesar de su notable valor ambiental y su aportación a los servicios ecosistémicos, han sido menos estudiados (Vidal-Abarca et al., 2020) y menos valorados que aquellos con agua permanente, y se encuentran frecuentemente en estado alterado (Cariñanos, 2010) debido a la ocupación, cambios en el trazado y la fisionomía, el vertido de residuos o la llegada de contaminantes procedentes de actividades de su entorno que, con frecuencia, terminan alcanzando las zonas costeras. En muchas ocasiones, la modificación es tan intensa que dificulta la recuperación natural y es necesario la intervención a través de actuaciones destinadas a la renaturalización de estos cauces.

Las ramblas mineras se encuentran especialmente afectadas por la actividad extractiva desarrollada en la sierra Minera que cesó hace casi medio siglo y el entorno no ha sido todavía restaurado, causando importantes impactos negativos sobre el ecosistema y las poblaciones circundantes. Por ello, es fundamental abarcar las acciones necesarias para asegurar la valoración, conservación y recuperación de estos am-

bientes. La RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN Y LA MEJORA AMBIENTAL EN EL DOMINIO PÚBLICO HIDRÁULICO DE LAS RAMBLAS DE LA SIERRA MINERA DE CARTAGENA (T.M. CARTAGENA) está siendo desarrollada por la Confederación Hidrográfica del Segura en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR); también se incluye en la línea 02. Restauración y mejora ambiental en el ámbito de la cuenca del Mar Menor. Soluciones basadas en la naturaleza (apartado 2.2.- Renaturalización y mejora ambiental de las Ramblas y creación de corredores verdes que doten de conectividad a toda la red de drenaje, en especial en las ramblas afectadas por la minería) del Marco de Acciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor, en el ámbito de la mejora ambiental de ramblas y restauración de zonas afectadas por la minería y en el Programa de medidas del Plan de gestión del riesgo de inundación de la Demarcación Hidrográfica del Segura, entre las medidas de restauración fluvial y de restauración hidrológico-forestal. Esta actuación cuenta con dos fases, la primera de ellas formada por un proyecto con una inversión prevista de 7.740.038 € que se desarrolla durante 36 meses hasta mayo de 2025, y la segunda, formada por tres proyectos que suponen alrededor de 22.000.000 € de inversión.

3.4.2. Objetivo

El proyecto pretende contribuir a la restauración hidrológico-forestal y mejora de la biodiversidad en las ramblas mineras vertientes al mar Menor con el fin último de mejorar ambientalmente estos cauces, reducir el riesgo de inundación, y disminuir la erosión y los aportes de sedimentos y contaminantes a la laguna, a través de actuaciones hidrológico-forestales. Para ello, se incluye la creación de infraestructuras hidrológicas y actuaciones de Adaptación Basada en los Ecosistemas (ABE) en varios tramos de las ramblas mineras vertientes al mar Menor, procedentes de la fachada norte de la sierra Minera.

El presente presenta la metodología implementada en la recuperación y mejora del estado ambiental de las ramblas mineras y las herramientas destinadas a superar los principales obstáculos encontrados, así como una revisión del éxito a corto y medio plazo de estas técnicas, las incertidumbres pendientes de resolver y las conclusiones obtenidas, con el fin de mostrar recursos que han resultado de utilidad en la recuperación de estos ambientes.

3.4.3. Las ramblas mineras

Las actuaciones se concretan en el Dominio Público Hidráulico (DPH) de cuatro ramblas mineras procedentes de la fachada norte de la sierra Minera (Cartagena-La Unión) vertientes al mar Menor, incluyendo (de norte a sur) las ramblas de las Matildes, de Mendoza (El Beal), de Ponce y de la Carrasquilla (**Figura 1**).

Los sedimentos arrastrados por estas ramblas incluyen, en mayor o menor medida, elevadas concentraciones de metales pesados procedentes de los estériles mineros derivados de la actividad extractiva desarrollada en la sierra Minera. Ni los depósitos ni los cauces habían sido todavía sellados ni restaurados desde que cesó la actividad hace algo menos de 50 años, tarea que ha comenzado recientemente. Los residuos mineros acumulados principalmente en depósitos ubicados en la cabecera y lechos de las ramblas son materiales fácilmente erosionables (Martínez-López, 2019), calculándose que hasta el 60% del volumen de estos se encuentra en las cuencas de las ramblas que vierten al mar Menor (Marín Guirao et al, 2007; Martínez-López, 2019).

La cercanía a la costa y la orientación de la sierra propician una humedad relativamente alta respecto al contexto semiárido en el que se ubican, haciendo que la vertiente norte de la sierra Minera sea la zona más húmeda del campo de Cartagena (Rodríguez et al, 1995), lo que permite un mayor desarrollo de la cubierta vegetal.

Existe una heterogeneidad evidente entre los cauces y entre distintos tramos de cada uno de ellos, derivada de las distintas morfologías, condiciones ambientales y perturbaciones a las que se han visto sometidos. Así, la comunidad vegetal y el paisaje hacen patentes los cambios en el gradiente de disponibilidad hídrica. Por otra parte, las ramblas de las Matildes y de Mendoza, y especialmente, esta última, han sido las más afectadas por la actividad minera. La alteración del suelo y de la cubierta vegetal derivadas de la remoción del terreno se suma a mayores concentraciones de elementos tóxicos, y valores más extremos de pH y conductividad. Estas condiciones son extremadamente variables en pequeñas escalas temporales y espaciales, influenciadas por la llegada periódica de sedimentos y aguas de drenaje ácido de mina (Pérez-Espinosa, 2014; Alcolea, 2015). El elevado estado de degradación, las condiciones físico-químicas del suelo y el contenido en elementos tóxicos y fácilmente movilizables (González-Fernández et al, 2011) dificultan el establecimiento natural o de origen humano de vegetación, y agrava el movimiento de los sedimentos. Además de la problemática ambiental, esto ha tenido repercusiones socioeconómicas y sobre la salud de las poblaciones del entorno. La complejidad de cualquier labor de restauración, unida a la cercanía y sensibilidad de la población local, justifica la utilización de una variedad de técnicas de recuperación y reforzamiento de la cubierta vegetal, que deben estar adaptadas a las condiciones ambientales y sociales.

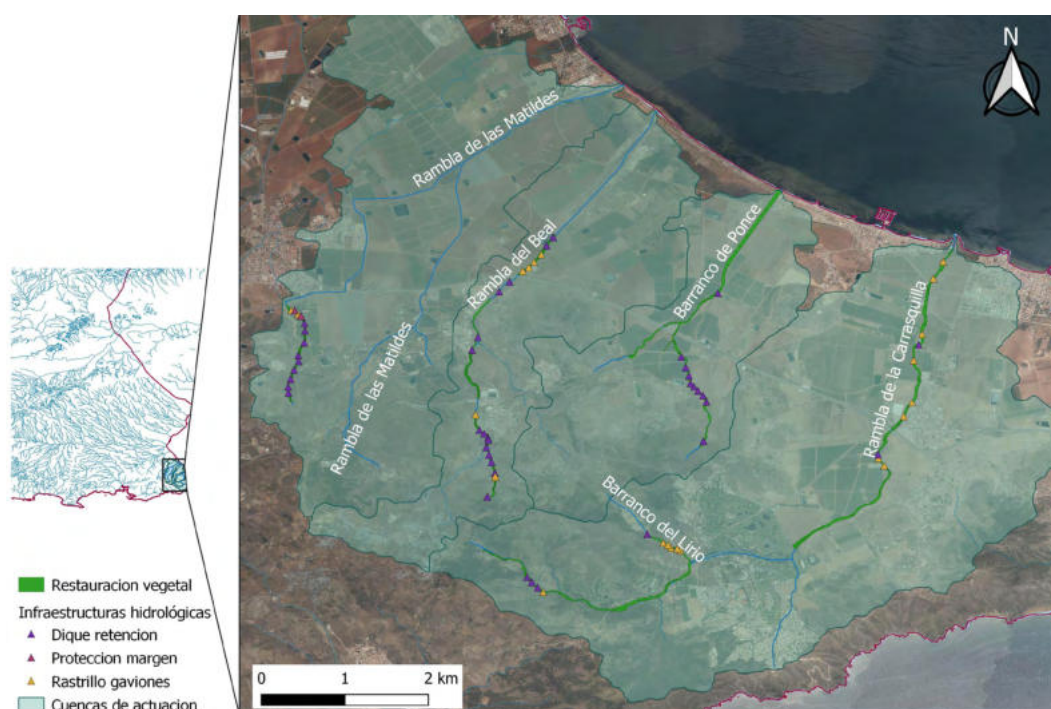


Figura 1. Localización de las infraestructuras hidrológicas y de las actuaciones de recuperación de la cubierta vegetal a lo largo de las cuatro ramblas mineras principales.

3.4.4. Actuaciones para la recuperación ambiental de cauces temporales

Infraestructuras hidrológicas

Con el fin de mejorar el perfil del cauce, y reducir la erosión, el arrastre y posterior llegada de materiales sólidos con presencia de metales pesados al mar Menor, se han construido más de 60 estructuras hidrológicas a lo largo de las diferentes ramblas, incluyendo la recuperación de diques ya existentes (Figura 1). La tipología más frecuente ha sido diques de retención de mampostería hidráulica y de gaviones de escollera que han oscilado entre los 2 y 6 m de altura, que incluían, en ambos casos, un cuenco amortiguador de energía aguas abajo y rastrillos o delimitadores de fondo de 0,5 a 1 m de altura, destinados a disminuir la erosión; así como rastrillos de gaviones, albarradas y protecciones de márgenes de cauce a través de muros longitudinales.

Para el seguimiento de la retención de sedimentos se han calculado los volúmenes previos y posteriores a eventos de avenida a través de datos topográficos

de altura de sedimentos y datos de imagen a partir de vuelos verticales de dron que permiten medir cambios en la red de drenaje.

Por otra parte, el CEBAS (Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, CSIC), en colaboración con la ETH Zürich (*Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Instituto Federal de Tecnología de Zurich*) y la UPV (Universidad Politécnica de Valencia), ha puesto en marcha un sistema de observación piloto de bajo coste para evaluar el funcionamiento de la rambla de Ponce y el efecto de los diques de retención con el objetivo de determinar la cantidad, calidad y origen de los sedimentos que alcanzan los cauces y, previsiblemente, el mar Menor. Para ello, se estimará el caudal recibido mediante análisis de imágenes de video registradas automáticamente, otros datos empíricos y resultados de modelos, y la cantidad de sedimento retenido, y se comparará su composición con la del transportado en la escorrentía, y el presente en los suelos del entorno (González-Barberá, G. com pers. 2024).

3.4.5. Técnicas de mejora ambiental a través de Soluciones basadas en la Naturaleza

Control de Especies Exóticas Invasoras

En las ramblas mineras pueden encontrarse más de una veintena de especies vegetales exóticas invasoras, favorecidas por la cercanía a infraestructuras (carreteras y polígonos industriales), poblaciones y caseríos. Los mecanismos de eliminación han variado según las especies y las condiciones del área a tratar (tabla 3.3.1). Por ejemplo, la metodología de tratamiento más habitual ante para caña común ha sido la extracción mecánica del rizoma mediante maquinaria. Posteriormente, la mezcla rizoma-suelo era cribada con una retroexcavadora giratoria, devolviendo el sustrato y reduciendo el volumen de residuo. De manera previa a su eliminación, el rizoma era desecado in situ en una zona impermeable que no permitiera su rebrote. En las zonas en las que no era posible la remoción del suelo, generalmente por la presencia de vegetación autóctona, se han realizado desbroces reiterados, con el objetivo de controlar los rebrotes hasta que los nuevos plantones que se instalen sean capaces

de superar en tamaño a la caña y sombrearla, limitando así su capacidad de crecimiento. Las especies arbóreas como la acacia han sido taladas y posteriormente desmontadas; en el caso de las arbustivas y herbáceas, como el gandul, la banderita española, o el ricino, se ha procedido a su arranque en caso de ser posible, o desbroce.

Es indispensable realizar un mantenimiento de la actuación mediante el control y eliminación de rebrotes, ya provengan estos de semillas o de restos de tallo o raíces (ver tabla 3.3.1); así como un adecuado cubrimiento de la superficie a través de vegetación autóctona. Ambos tipos de propágulos pueden permanecer en el terreno durante años, por lo que se recomienda evitar la dispersión de semillas, ya sea realizando el desbroce de manera previa al periodo de producción de semillas, eliminando las inflorescencias antes de que estas maduren, o cubriendo las inflorescencias durante su eliminación. El arranque de los plantones rebrotados puede reducir drásticamente el banco de semillas y, con ello, el esfuerzo en el control durante los años posteriores.

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	GISD	100 WORST	ATLAS	ESTATUS LEGAL (RD 630/2013)	DISP	MECANISMO CONTROL
Acacia, mimosa	<i>Acacia</i> spp.	x (23 sp)	x (2 sp)	x (5 sp)	<i>Acacia dealbata</i> está incluida para el ámbito de actuación. <i>A. farnesiana</i> ; <i>A. salicina</i> incluidas para Canarias	T; R; S	Tala y destocoado
Caña común	<i>Arundo donax</i>	x		x	Incluido únicamente para Canarias	Riz	Extracción de rizoma o desbroce reiterado
Cactus alfileres de Eva	<i>Austrocylin-dropuntia subulata</i>			x	<i>Cylindropuntia</i> spp. (sinonimia)	T; R	Eliminación mecánica
Banderita española	<i>Lantana cámara</i>	x	x	x		S	Arranque de raíz
Gandul, tabaco moruno	<i>Nicotiana glauca</i>	x		x	Incluido	R; S	Arranque de raíz
Rabo de gato	<i>Pennisetum setaceum</i>	x		x	Incluido	S	Arranque de raíz tras envolver la inflorescencia
Ricino	<i>Ricinus communis</i>	x		x	Incluido únicamente para Canarias	S	Arranque y/o desbroce reiterado

Tabla 1. Listado de las especies encontradas más frecuentemente en las ramblas mineras sobre las que se ha actuado. (GISD: especie incluida en la Base de Datos Global de Especies invasoras (ISSG, 2015); 100 worst: especie incluida en 100 de las Especies Exóticas Invasoras más dañinas del mundo (Lowe et al, 2004); Atlas España: Especie incluida en Atlas de las Plantas Alóctonas Invasoras en España (Sanz-Elorza et al, 2004); Disp: mecanismo principal de dispersión: T: restos de tallo, R: restos de raíz, Riz: restos de rizoma, S: semilla).

Recuperación y diversificación de la cubierta vegetal

La recuperación y diversificación de la cubierta vegetal ha sido una estrategia clave para la recuperación de los cauces (figura 3.3.1). En la mayor parte del área de actuación se ha realizado una plantación en los taludes y la cabeza de talud mediante ahoyado mecánico, a una densidad de 4x4 m, y con un tamaño de hoyo aproximado de 0,8x0,8x0,8 m, formando un alcorque que permitiera acumular agua en lluvias y riegos de socorro.

Se han introducido más de 33.000 plantones de una savia de alrededor de 50 especies herbáceas, arbustivas y arbóreas autóctonas y variedades cultivadas producidos por viveros forestales comerciales locales, y por viveros públicos (Centro Nacional de Recursos Genéticos Forestales (CNRGF) El Serranillo y CNRGF Alaquàs de la Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico; y el

Vivero Forestal de El Valle, de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia), a través de la colaboración con la Subdirección General de Política Forestal y Lucha contra la Desertificación del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Las especies seleccionadas han sido repartidas a lo largo de las ramblas y del gradiente longitudinal y transversal del cauce en función de las características del mismo, de los requerimientos de las especies y del objetivo buscado. Así, por ejemplo, las especies que precisan más humedad, como el mirto, las encinas o las coscojas han sido instaladas mayoritariamente en los tramos altos de los cauces de la Carrasquilla y Ponce, y aquellas más tolerantes a la salinidad han sido reservadas para tramos bajos y zonas más degradadas; de manera general, en las partes bajas de talud se han instalado preferiblemente especies herbáceas y arbustos, mientras que aquellas de porte arbóreo o arbustivo de mayor tamaño han ocupado mayoritariamente la parte más alta, sirviendo como una delimitación del cauce que prevenga de futuras ocupaciones.

El mantenimiento de las plantaciones ha consistido en la realización de riegos periódicos, recomposición de alcorques, binados y eliminación de herbáceas adventicias competidoras durante una media de las dos primeras temporadas. Para evitar la depredación por herbívoros (principalmente conejo), se han instalado protectores individuales, seleccionando preferentemente modelos biodegradables de 40-50 cm de altura de malla plástica de origen vegetal o de cartón. En el caso de paso de ganado, también se instalaron corrales de malla para impedir el paso del rebaño sobre la plantación, que no han sustituido a los protectores individuales, lo que ha permitido la recuperación también de la cubierta herbácea fuera de los alcorques.

En las zonas más alteradas o con condiciones físico-químicas más complejas (acidez, conductividad, presencia de elementos tóxicos, etc.), es necesario adaptar las técnicas tradicionales de plantación para

facilitar el arraigo, aumentar la probabilidad de éxito de la actuación y reducir el riesgo de movilización de metales. Así, se han realizado ensayos demostrativos en zonas llanas y taludes con pendiente consistente en la diversificación de técnicas para mejorar las propiedades edáficas e implantar una cubierta vegetal. Para ello se ha realizado (1) la preparación del suelo mediante enmiendas en el alcorque del plantón o directamente sobre el suelo (únicamente para siembra), formadas por compost de origen vegetal al que se ha adicionado una cantidad de carbonato cálcico en función del pH del tramo, o por sustrato natural, (2) la cubrición del suelo mediante geotextil vegetal en taludes con elevada inclinación y en parte de las zonas planas, (3) la reducción de la alteración de la superficie del suelo mediante la reducción de densidad de la plantación y tamaño de alcorque a 0,4x0,4x0,4 m, y (4) la siembra directa de semilla en las que se ha utilizado diferentes enmiendas (**Tabla 2; Figura 2**).



Figura 2. izda: ensayo realizado en zonas llanas en las que se evalúa el resultado de las siembras en sustratos con distintas enmiendas y con cubrición, o no, de manta vegetal; dcha: estado de talud tras enmienda con tierra vegetal, siembra y cubrición de talud mediante manta vegetal. En ambos se puede comprobar la existencia de germinación siendo mayor en las zonas cubiertas con manta vegetal.

Diversificación refugio y puntos de reproducción para fauna

La recuperación de las comunidades faunísticas se ve muy favorecida por la renaturalización de los espacios, y puede verse impulsada por el aporte artificial de recursos, como refugios. El proyecto ha incluido la construcción de 3 charcas y la instalación de 650 refugios para diferentes grupos faunísticos (invertebrados, aves y murciélagos; **Figura 3**) distribuidos a lo largo de las ramblas. Algunos criterios básicos en el diseño de su construcción y su instalación han sido:

- Refugios para fauna invertebrada: estructura construida en madera y rellena con paja, piñas, astillado de madera (o mezcla de es-

tos dos últimos), cañas o tacos agujereados. Han sido instalados mirando al sur o sureste, en grupos de 3-6, sin mezclar los rellenos de mezcla con aquellos destinados a himenópteros solitarios (cañas y tacos).

- Nidales para aves:
 - Nidales para aves passeriformes: estructuras de madera que incluyen modelo cerrado con agujero de 3,6 cm de diámetro (para especies como el herrerillo capuchino y carbonero común); y modelo balcón (para especies como la lavandera blanca o el petirrojo). Han sido instaladas sobre pie de árbol, colgadas de ramas a un mínimo de 3 m de altura, evitando facilitar el acceso a depreda-

dores, eliminando para ello algunas ramas inferiores en caso de ser necesario. Se ha tenido en cuenta el comportamiento territorial en época de cría, por lo que se ha dejado al menos 50 m de distancia entre los nidales del primer modelo y 200 m en el caso del segundo.

- Nidales para abubilla, mochuelo y cernícalo: estructura de madera de aprox. 50x30x30 cm que han sido instaladas en suelo cubiertas con roca (tipo majano, usadas por abubilla o mochuelo) o sobre poste de madera de un mínimo de 4 m de altura (destinadas a cernícalo, pueden ser utilizadas por las especies anteriores, u otras como grajilla). Estas últimas han sido instaladas dejando una distancia de un mínimo de 200 m con otros refugios para evitar la posible depredación sobre pollos o murciélagos que ocuparan estas estructuras artificiales.
- Oquedades para abejarucos de unos 6 cm de diámetro, realizadas en taludes de rambla de sustrato arenoso, a un mí-

nimo de 2 m de altura. Se han realizado en agrupaciones, teniendo en cuenta el carácter gregario de la especie durante la reproducción. La broca del taladro debe tener un diámetro inferior al deseado para la oquedad, ya que el aumento de tamaño de la entrada podría facilitar el acceso a depredadores

- Refugios para murciélagos tipo Kent, contruidos en madera sin tratar, e instalados sobre postes de 4 m de altura. En cada poste se han fijado 3 cajas, y estos han sido colocados en agrupaciones de 3-5 postes. El modelo de refugio facilita el seguimiento y suprime la necesidad de mantenimiento.
- Charcas para anfibios: se han construido aledañas a los cauces fuera de la zona de inundación, excavando sobre el terreno y colocando una lámina geotextil impermeable, cubierta con sustrato y rodeada de roca. Se ha preferido la localización en zonas sombreadas y con presencia de humedad en el cauce. No obstante, han requerido ser rellenadas de forma periódica con agua.



Figura 3. izda: refugios de invertebrados y de abubilla o mochuelo en majano; centro: murciélago dentro de un refugio, donde se aprecian las hendiduras interiores que permiten la escalada del animal; dcha: nidal para aves paseriformes instalado sobre un pie de pino, atendiendo a alejar la caja del tronco central para impedir el ascenso de depredadores.

3.4.6. Asesoramiento y seguimiento ambiental

Las actuaciones han contado con asesoramiento y colaboración de diferentes grupos científicos, así como un seguimiento ambiental continuado que ha permitido determinar el éxito de las intervenciones, y adaptarlas en caso de ser necesario.

De manera general, se han realizado seguimientos regulares de la supervivencia de las plantaciones y de los ensayos, a través de visitas periódicas y conteos. Para ello, se ha determinado el número total de marrras, el porcentaje de supervivencia y las especies su-

pervivientes en tramos específicos, representándose estos datos en mapas. Igualmente, se ha comprobado periódicamente la ocupación de los refugios y nidales de fauna mediante métodos no invasivos, con la utilización de un foco de luz y cámara endoscópica.

Para el diseño de las enmiendas se ha contado con el asesoramiento científico del Equipo PhytoRec del grupo Sostenibilidad del Sistema Suelo-Planta del Departamento Conservación de Suelos y Agua y Manejo de Residuos Orgánicos del CEBAS/CSIC.

3.4.7. Participación social y colaboración

La degradación del entorno ha causado efectos sobre la salud de las personas y el desarrollo socioeconómico. Por ello, la población local debe conocer los objetivos de las actuaciones, y las medidas deben ser consensuadas con los grupos sociales, ya que son conocedores del entorno y las necesidades. Para lograr esto, se han realizado reuniones y encuentros con organizaciones vecinales y ambientales locales, en las que se ha dado a conocer los proyectos y las técnicas empleadas, y se han recogido las demandas, que se han tenido en cuenta en la medida de lo posible. Además, se ha trabajado con profesionales del sector ganadero para compatibilizar el pastoreo con la recuperación de la vegetación. Esto ha permitido, por una parte, mejorar la relación con la comunidad local, y por otra, adaptar

ciertos aspectos de las actuaciones en marcha y del diseño de actuaciones futuras en el entorno.

Se ha incluido una convocatoria de voluntariado que ha permitido que asociaciones locales desarrollen actividades de restauración y educación ambiental en las ramblas vertientes al mar Menor y otros cauces del campo de Cartagena. El 40% de los proyectos concedidos se han centrado en las ramblas mineras, lo que ha permitido desarrollar actuaciones que han abarcado diversas temáticas como la eliminación de especies exóticas, la implantación de vegetación autóctona, la recogida de semillas para futuras actuaciones de restauración en el área, la instalación de refugios de aves o la divulgación y educación ambiental.

3.4.8. Resultados preliminares, incertidumbres por resolver y propuestas de futuro

La recuperación ambiental de los cauces es fundamental para la sostenibilidad ecológica y social, y las ABE son una solución eficiente y sostenible en recursos, aunque precisan de una importante inversión inicial y de mantenimiento durante los primeros años. Los resultados presentados parten de una experiencia local limitada a dos años, por lo que se precisa más tiempo para comprobar el estado a medio plazo.

Las **infraestructuras hidrológicas** han demostrado realizar un papel efectivo a la hora de captar sedimentos arrastrados en los cauces. La inclusión de cuencos amortiguadores y rastrillos de fondo han sido fundamentales para disminuir la erosión y mejorar la estabilidad del cauce.

El **control de especies exóticas** precisa de intervenciones prolongadas de un mínimo de dos temporadas y que pueden llegar incluso a décadas debido a la existencia de un banco de semillas. Estas también deben coordinarse con la población local para evitar recolonizaciones de estas especies desde áreas vecinas. Las técnicas a emplear deben adecuarse a la biología y la ecología de la especie, así como a la configuración del terreno y los recursos disponibles:

- En el caso de la caña común, la eliminación de rizoma y posterior criba del material extraído con utensilios específicos supone una inversión en tiempo, pero ha resultado muy eficiente (**Figura 4**). Esta técnica es recomendable en

cauces temporales con una baja cobertura vegetal, ya que reduce drásticamente el número de repeticiones respecto a los desbroces reiterados, y el tiempo de espera antes de la plantación respecto a la cobertura que, además, resultaría muy poco eficiente en zonas profundas debido a la escasa humedad del terreno.

- La expansión del ricino, una especie que ha aumentado su presencia recientemente en el campo de Cartagena, parece estar favorecida por la ausencia de heladas y las primaveras húmedas. La confirmación de esto permitiría adoptar medidas de bajo impacto para eliminar el enorme banco de semillas que puede producir una sola planta favoreciendo una germinación masiva mediante riegos artificiales en la época idónea, y posterior arranque manual.

La respuesta de las plantaciones de la **restauración de la cubierta vegetal** ha sido desigual, oscilando la supervivencia al año de plantación entre el 50 y el 90% de los plantones introducidos. Este resultado parece estar influenciado por las características ambientales (edáficas y climatológicas), el diseño y la ejecución de la plantación, y el mantenimiento posterior.

- Los riegos de socorro son clave, especialmente en la temporada estival, pero los resultados están igualmente limitados por las condiciones ambientales. La capacidad del suelo de retención de la humedad se ha identificado

como un factor determinante en la supervivencia de la planta, lo que se puede abordar mediante enmiendas y aportes. La mortalidad de los plantones también aumenta durante los años especialmente secos, aunque se incrementa la frecuencia de los riegos de socorro.

- Parte de la planta instalada en las zonas con alta humedad ambiental ha podido sobrevivir en ausencia de riego, incluyendo especies con necesidades hídricas medias, como mirtos, encinas y coscojas; aumentando notablemente el porcentaje de éxito en zonas con condiciones similares que sí han contado con un aporte hídrico. Por tanto, tanto la humedad del terreno como los aportes extras contribuyen a la supervivencia de los plantones.
- El manejo de los ejemplares durante la implantación puede influir en el arraigo, debiendo realizarse en momentos de parada vegetativa de la planta y evitando condiciones extremas de calor o viento (o frío en otras zonas de la península), manteniendo los cepellones protegidos y cubriéndolos suficientemente con el sustrato en la plantación.
- La diversificación de técnicas de revegetación aumenta las posibilidades de éxito en la recuperación de la cubierta vegetal. Así, siembra directa ha resultado ser una técnica viable siempre que cuente con riegos de socorro, al igual que ocurre en las plantaciones.
- El uso de enmiendas ha mejorado la supervivencia y el crecimiento de los plantones, lo que puede deberse a la mejora de las condiciones químicas o físicas, especialmente la retención de agua. Estas enmiendas deben diseñarse de manera específica según las condiciones edáficas de partida que se pretendan rectificar. Será necesario realizar un seguimiento a largo plazo para comprobar la supervivencia de estos ejemplares una vez que las raíces rebasen los límites de la enmienda.
- La cubrición mediante mantas vegetales ha supuesto una diferencia considerable en la tasa de germinación y supervivencia en las áreas sembradas, tanto en zonas llanas como en aquellas con pendiente, muy probablemente debido a que estas mantienen la humedad. Al ser confeccionadas únicamente con material vegetal hace innecesario su retirada, sujetando el terreno mientras se facilita la implantación de vegetación que reducirá la erosión tras la degradación del geotextil.
- La reducción del tamaño del ahoyado puede disminuir la remoción de suelo, pero dificulta el riego posterior, ya que el volumen de agua

acumulado puede no ser suficiente para mantener la humedad durante el periodo estival.

- La protección de la planta ante los herbívoros debe adaptarse a la fauna local, destacando el conejo y los ungulados domésticos (principalmente ganado ovino) en la zona que se ubica la actuación descrita. Para evitar la depredación por conejo, es suficiente con instalar un protector individual de 40-50 cm de altura. Se precisan de seguimientos que permitan determinar la influencia del modelo del protector según los requerimientos de las especies, y la insolación y humedad ambiental. Los protectores opacos pueden resultar un limitante para las especies con menos tolerancia al sombreado, pero también facilitar la supervivencia de otras que lo resisten durante el verano, y que se ven favorecidas por la humedad. Sin embargo, el sombreado durante meses puede dificultar el endurecimiento progresivo de la planta, por lo que debería evitarse la retirada de estos protectores opacos durante los meses estivales.
- Especies arbustivas como el taray (*Tamarix* sp), el acebuche (*Olea europea*), el azufaifo (*Ziziphus lotus*), la boja (*Dorycnium pentaphyllum*), baladre o adelfa (*Nerium oleander*), la retama (*Retama sphaerocarpa*), lechuga de mar (*Limonium cossonianum*) y herbáceas, como el albardín (*Lygeum spartum*) y el esparto (*Macrochloa tenacissima*) han tenido una mayor supervivencia de manera generalizada en diversos ambientes. En restauración vegetal se recomienda una mayor diversidad de especies y estratos, incluyendo especies arbóreas como el algarrobo (*Ceratonia silicua*), el pino (*Pinus halepensis*), o el ciprés de Cartagena (*Tetraclinis articulata*), que, aunque la supervivencia ha sido algo menor, esta ha sido suficiente para aportar heterogeneidad ambiental.

La ocupación de los **refugios para fauna** ha sido variable a lo largo de los meses y de los modelos de estos:

- En el caso de los refugios para invertebrados, se encontró una ocupación de la práctica totalidad de aquellos prospectados tipo taco (oquedades para himenópteros solitarios en tacos de madera), excepto en la zona arbolada del tramo alto de la rambla de la Carrasquilla, lo que puede indicar una baja disponibilidad de refugio para este grupo en los ambientes desnudos o únicamente con estrato herbáceo.
- Entre los niales para aves paseriformes únicamente han sido ocupados el modelo

cerrado o “de carbonero”, siendo utilizados únicamente durante la temporada de cría por carbonero común (*Parus major*) y herre-rillo capuchino (*Lophophanes cristatus*). La ocupación fue rápida, encontrándose aproximadamente un cuarto de los nidos ocupados en la primera revisión realizada dos meses después de su instalación. La ocupación durante los dos primeros años ha sido cercana al 50% de las cajas instaladas, pero especialmente en el caso de la productividad, parece ser levemente superior en el primer año, lo que puede deberse a que la precipitación fue mucho más escasa durante la segunda temporada, afectando a la disponibilidad de recursos alimenticios.

- Se ha registrado ocupación de los refugios de murciélagos en la segunda revisión a los 3 meses de su instalación. Estos refugios han contado con una tasa de ocupación levemente superior por este grupo durante los meses invernales. Estas cajas también son utilizadas por invertebrados y reptiles, lo que aumenta el hábitat disponible para varios grupos.

Es esencial realizar un **seguimiento** continuado de las actuaciones para evaluar el estado, mejorar la eficiencia, y realizar las adaptaciones necesarias que aseguren la consecución de los objetivos previstos. Para ello, los proyectos deben tener un diseño adaptativo y flexible que permita prever posibles dificultades y adecuarlos a las condiciones ambientales (como estado del suelo o variación en las precipitaciones) y a las necesidades socioeconómicas del entorno.

La **implicación de la población local** aporta diversas perspectivas, identifica necesidades locales y fomenta la transparencia y confianza. Involucrar a la comunidad favorece la sostenibilidad del proyecto y el vínculo con las actuaciones y sus resultados.

Contar con la **colaboración de entidades de investigación** y con asesoría científica proporciona rigor y facilita la evaluación, mejorando la toma de decisiones y aumentando la credibilidad del proyecto. La sinergia entre el conocimiento científico, la ejecución técnica y la **coordinación con otras Administraciones Públicas** mejora la eficiencia de los recursos y las probabilidades de éxito, resultando en actuaciones más sostenibles.



Figura 4. Desembocadura de la Rambla de Ponce en distintas fechas, donde se aprecia los cambios en el paisaje desde la eliminación de la caña al crecimiento de los plantones: arriba izda: otoño 2022, arriba dcha: primavera 2023; medio izda: invierno 2023, medio dcha: primavera 2024, abajo: verano 2024.

Bibliografía

- Alcolea Rubio, L. A., (2015). Geoavailability of Ni, Cu, Zn, As, Cd, and Pb in the Sierra de Cartagena- La Unión (SE Spain). Tesis Doctoral.
- Cariñanos, P., (2010). Propuesta de recuperación de la rambla de Chirivel como elemento de valor paisajístico del sureste peninsular. *Ambientalia: Revista interdisciplinar de las ciencias ambientales*, Vol. 1(1): 208-221.
- González-Fernández, O., Rivero, L., Queralt, I. & Viladevall, M., (2011). Distribution of Metals in Vadose Zone of the Alluvial Plain in a Mining Creek Inferred from Geochemical, Mineralogical and Geophysical Studies: The Beal Wadi Case (Cartagena-La Union Mining District, SE Spain). *Water, Air, & Soil Pollution*. 221(1-4): 45-61.
- Invasive Species Specialist Group ISSG (2015). The Global Invasive Species Database. Versión 2015.1. Consultado en <https://www.iucngisd.org/gisd/> (26/04/2024)
- Lowe S., Browne M., Boudjelas S. & De Poorter M. (2004). *100 de las Especies Exóticas Invasoras más dañinas del mundo. Una selección del Global Invasive Species Database*. Publicado por el Grupo Especialista de Especies Invasoras (GEEI), (CSE, UICN), 12pp. Disponible en <https://www.iucngisd.org/gisd/pdf/100Spanish.pdf>
- Marín-Guirao, L., Lloret, J., Marín, A, García, G. & Garcia-Fernández, A.J., (2007). Pulse-discharges of mining wastes into a coastal lagoon: water chemistry and toxicity. *Chemistry and Ecology*. 23(3): 217-231.
- Martínez-López, S. (coord.) (2019). Estudio del estado del Arte de las investigaciones, estudios, publicaciones y líneas de investigación iniciadas de las diferentes administraciones, universidades y otros organismos científicos sobre las explotaciones mineras de la sierra minera de Cartagena-La Unión y sus efectos en el Mar Menor. *Dirección General de Medio Ambiente y el Mar Menor de la Consejería de Empleo, Universidades y medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia*. 230 pp.
- Pérez Espinosa, V., (2014). *Inmovilización de Elementos Potencialmente Tóxicos en Zonas Mineras Abandonadas mediante la Construcción de Tecnosoles y Barreras Reactivas Permeables*. Tesis Doctoral
- Real Decreto 630/2013, de 2 de agosto, por el que se regula el Catálogo español de especies exóticas invasoras. BOE núm. 185, de 3 de agosto de 2013, pp 56764-56786 (23 págs.). <https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/08/02/630>
- Rodríguez, L. F., Millán, R., Álvarez, A. M., García, G., & Cardona, A. I. (1995). Estudio de una Rambla Afectada por la Actividad Minera: rambla del Beal, Cartagena (Murcia). *Informes técnicos Ciemat*. Departamento de Medio Ambiente. 92 pp. Disponible en https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/113/41113304.pdf
- Sanz-Elorza, M., Dana-Sánchez, E.D. & Sobrino, E., (eds.) (2004). *Atlas de las Plantas Alóctonas Invasoras en España*. Dirección General para la Biodiversidad. Madrid, 384 pp. Disponible en https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventario-especies-terrestres/inventario-nacional-de-biodiversidad/ieet_flora_vasc_aloet_invas_capitulos.html
- Sánchez Escolano, L. & Toro, F. (2020). Las ramblas del Sureste español como medio de vida: una aproximación al caso almeriense. *Cuadernos de Geografía de la Universitat de València*. 75. 10.7203/CGUV.105.18138.
- Vidal-Abarca, M.R., Gómez, R., Sánchez-Montoya M.M., Arce, M.I.; Nicolás, N. & Suárez, M.L. (2020). Defining dry rivers as the most extreme type of non-perennial fluvial ecosystems. *Sustainability*. 12(17): 7202.

3.5. Seguimiento y evaluación de la efectividad de las actuaciones de restauración

AUTORES: Jose Antonio Navarro-Cano, Sara Sánchez Moreno y Marta Goberna Estellés. Dpto. de Medio Ambiente y Agronomía · Instituto Nacional de Investigación y Tecnología agraria y Alimentaria (INIA, CSIC); Javier Giménez Martín. TRAGSATEC. Delegación Murcia; Zorica Nedeljković. entro Iberoamericano de la Biodiversidad (CIBIO), Parque científico, Universidad de Alicante

3.5.1. La importancia de los programas de seguimiento en restauración

El seguimiento y evaluación del éxito de cualquier proyecto de restauración es el único mecanismo objetivo para estimar, a través de indicadores cuantitativos o semicuantitativos, el grado de cumplimiento de los objetivos del proyecto en el tiempo. También permite detectar y corregir desviaciones con respecto a la trayectoria objetivo prevista para el ecosistema restaurado. Por último, el seguimiento en el tiempo de las acciones de restauración permite determinar el momento en el que se ha alcanzado la imagen objetivo programada.

En el medio terrestre, tradicionalmente no se ha realizado el seguimiento de los programas de restauración, rehabilitación de suelos o reforestación. La ausencia de normativa que conminara a hacerlo, así como las dificultades para dotar presupuestariamente ese seguimiento con un horizonte temporal a medio o largo plazo, hacía poco viable el diseño de los programas de seguimiento en el marco de los proyectos de restauración. Por ello, muchos proyectos se han limitado a evaluar la supervivencia de vegetación implantada tras la ejecución del proyecto para reponer mallas en el corto plazo. Ocasionalmente, se han realizado evaluaciones generales de proyectos de restauración, ligadas a programas de financiación concretos o ante eventos catastróficos que han generado alarma en la opinión pública o en la comunidad científica, como en el caso de los decaimientos masivos de arbolado ligados a eventos de sequía. A esa ausencia histórica de programas regulares de seguimiento puede haber contribuido la falta de estándares y directrices oficiales en los proyectos. Como muestra, en el manual clásico “Restauración Hidrológico-Forestal de Cuencas

y Control de la Erosión” (VV.AA. 1998), documento técnico con financiación gubernamental, no aparecía ningún capítulo referido a la evaluación posterior o seguimiento de las actuaciones para cuantificar el grado de cumplimiento de los objetivos del proyecto. Durante los últimos años, estos planes de seguimiento se consideran ya fundamentales para garantizar el éxito de las obras y poder realizar una gestión adaptativa (Arranz González et al., 2019).

Entre los primeros intentos de dotar de unos estándares mínimos al seguimiento de una restauración, la Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica (SER 2004) propuso tres modelos de evaluación del éxito de una restauración ecológica, basados en la selección previa de un ecosistema de referencia o al menos, de los atributos que el ecosistema restaurado debía tener:

- a) la comparación directa, mediante el uso de entre 20 y 30 parámetros físicos y biológicos (cobertura, diversidad, etc.), que son medidos en el ecosistema restaurado y comparados con un equivalente de referencia,
- b) el análisis de atributos, en el que se cuantifica el grado de cumplimiento de los atributos (complejidad, conectividad, resiliencia) que debe cumplir un ecosistema restaurado,
- c) el análisis de trayectorias, basado en el seguimiento periódico de una serie de parámetros (mismos parámetros que en a) que permitan detectar una tendencia del ecosistema restaurado.

Los tres modelos presentan como inconveniente principal la dificultad para determinar adecua-

damente el ecosistema de referencia, es decir, aquél que se sitúa en un estado similar al existente antes de operar el agente de degradación. La SER (2005), en su Guía para elaborar y gestionar proyectos de restauración ecológica, aborda esta cuestión. En concreto, acepta que el ecosistema restaurado no necesariamente tiende a recuperar un estado inicial, sino que debido a cambios de los factores que controlan la dinámica del ecosistema, éste puede seguir una trayectoria de sucesión alterada que igualmente puede mejorar la salud, integridad y dinámica del ecosistema restaurado. Por otro lado, el modelo de evaluación por comparación directa con un ecosistema de referencia presenta el problema añadido de que, en muchos casos, los parámetros de contraste arrojarán valores discordantes en conjunto, con lo que es necesaria una ponderación de los mismos en la valoración global de la restauración. En el caso del modelo de evaluación por análisis de trayectorias, la dificultad estriba en la interpretación de las mismas según el análisis de las series temporales de datos (SER 2005). Este punto se ilustra bien con el trabajo de Crouzeilles et al. (2016), quiénes revisaron 221 estudios que evaluaban el éxito de proyectos de restauración. Los autores constataron una mejora significativa de la biodiversidad y estructura de la vegetación por comparación con el ecosistema degradado. Si bien, esta mejora fue muy variable en función del tiempo transcurrido desde la restauración, la intensidad y grado de fragmentación producidos por el agente de degradación y el estado ecológico de la matriz paisajística que rodea a la zona restaurada.

Durante los últimos años se han incorporado a los estudios sobre restauración conceptos de las ramas de la ecología funcional y trófica (Wainwright et al. 2018), que indagan en el papel funcional de las especies y de las interacciones ecológicas que se dan entre ellas en un ecosistema. Actualmente prima el interés por establecer comunidades con alta diversidad funcional, para restaurar de manera más eficiente las relaciones entre los distintos niveles tróficos y la funcionalidad de un ecosistema (Laughlin 2014). Por ello, es conveniente utilizar indicadores de los diferentes componentes de la diversidad, más allá de la diversidad taxonómica (número y abundancia de especies), que se relacionan mejor con funciones ecosistémicas de primer orden (Montoya et al., 2012). Se trata de métricas que incorporan la diversidad funcional, es decir la variabilidad de rasgos fenotípicos de las especies, idealmente de distintos niveles tróficos. También pueden utilizarse métricas de

diversidad filogenética, que incorporan la distancia evolutiva entre los linajes presentes en el ecosistema y sirven como indicadores de la diversidad funcional, ya que especies evolutivamente más distantes tienden a ser funcionalmente más dispares (Navarro-Cano et al. 2017). Sin embargo, las métricas funcionales y filogenéticas prácticamente no se han considerado hasta ahora en el seguimiento del éxito de la restauración. Como ejemplo, Ruiz-Jaen y Aide (2005) mostraron en una revisión global de evaluaciones de los resultados de actuaciones de restauración, que en la mayoría de los casos se usaron como indicadores la diversidad taxonómica vegetal o estructura de la vegetación, siendo escasos los trabajos que usaron indicadores de procesos ecológicos. En este sentido, tan solo la cuantificación de micorrizas se usó frecuentemente como un indicador de productividad vegetal y de actividad en términos de ciclado de nutrientes, dos elementos que se relacionan con procesos ecosistémicos clave como la mineralización de la materia orgánica o el secuestro de carbono en el suelo.

La SER, ha actualizado recientemente los estándares prácticos para la restauración de ecosistemas (Nelson et al. 2024). En ellos se señala el monitoreo y evaluación de las acciones realizadas como uno de los 10 principios básicos en cualquier programa de restauración, con 11 componentes a tener en cuenta, que pueden resumirse en tres puntos clave:

- a) Incorporación de actores locales. Al igual que en el proceso de diseño del programa de restauración, es necesario incorporar a los agentes locales en el proceso de diseño del plan de seguimiento y evaluación, para consensuar indicadores de calidad que sean ecológica-, cultural- y socioeconómicamente aceptables,
- b) Integración del plan de seguimiento en el diseño original del programa. El plan de seguimiento y evaluación debe diseñarse en conjunción con el programa de actuaciones de restauración. Debe incluir indicadores perfectamente definidos, así como su metodología de muestreo, análisis e interpretación, para satisfacer unos objetivos concretos y permitir su reproducibilidad,
- c) Accesibilidad de los resultados del seguimiento. Los resultados de los muestreos regulares, así como el informe final deben difundirse en un formato accesible tanto a la autoridad contratante como a la sociedad civil en general, de la manera más gráfica posible. En un plano más

técnico, las desviaciones observadas con respecto a la trayectoria deseada deben ser analizadas para el diseño y aplicación de medidas correctoras.

La SER recomienda el seguimiento y evaluación del éxito de la restauración mediante el desarrollo paralelo de dos ruedas de análisis multifactoriales (Gann et al. 2019). La <<Rueda de Recuperación Ecológica>>, basada en seis atributos clave del ecosistema, permite medir a partir de indicadores ecológicos la evolución en el tiempo de un programa de restauración. La <<Rueda de Beneficios Sociales>>, basada en seis atributos socioeconómicos y socioecológicos tiene la misma función

desde la perspectiva social. Los indicadores específicos usados en cada caso, así como su dimensión temporal deben estar adaptados a cada sitio y cada programa de restauración. Aunque originalmente es deseable que estos indicadores sean cuantitativos, a la hora de presentar la evolución de la restauración a la sociedad civil, se recomienda el uso del sistema de puntuación semicuantitativo <<Cinco Estrellas>> como manera gráfica de comparar la evolución de la restauración en el tiempo (Young et al. 2022). Un ejemplo de <<Rueda de Recuperación Ecológica>> con indicadores cuantitativos específicos que pueden ser útiles en restauración de área mineras en ambientes semiáridos se presenta en la [Tabla 1](#).

ATRIBUTOS	INDICADORES DEL NIVEL DE RECUPERACIÓN		
	CORTO PLAZO 1-5 AÑOS	MEDIO PLAZO 5-15 AÑOS	LARGO PLAZO > 15 AÑOS
AMENAZAS			
Actividad minera, pastoreo, incendio, sequía	Cese o < tasa de afección	Cese interior y < tasa de afección exterior	Cese exterior
Especies invasoras	< Cobertura y reclutamiento	< Cobertura y reclutamiento	< Cobertura y reclutamiento interior y exterior
Contaminación química	≤ Concentración de contaminante	< Concentración de contaminante	< Concentración de contaminante interior y exterior
CONDICIONES AMBIENTALES			
Sustrato físico	≤ Tasa de erosión ≥ Fertilidad física	< Tasa de erosión > Fertilidad física	< Tasa de erosión > Fertilidad física
Sustrato químico	= Materia orgánica y nutrientes	≥ Materia orgánica y nutrientes	> Materia orgánica y nutrientes
Condiciones termohídricas	= % Humedad y Temperatura en superficie	> % H y < T en superficie	> % H y < T en superficie
COMPOSICIÓN DE ESPECIES			
Plantas objetivo	Supervivencia > 50 % Crecimiento > 50 %	Reproducción > 50 % de supervivientes	Reclutamiento natural ≥ 50 % de supervivientes
Animales objetivo	> Abundancia nematodos > Polinizadores Campeo predadores	> Abundancia nematodos > Polinizadores Reproducción predadores	≥ Abundancia nematodos ≥ Polinizadores Incremento poblacional predadores
Microbiota edáfica objetivo	≤ Abundancia de bacterias fotótrofas y quimiolitótrofas ≥ Abundancia de hongos micorrizógenos	≥ Abundancia de bacterias heterótrofas y hongos micorrizógenos	> Abundancia de bacterias heterótrofas y hongos micorrizógenos

ATRIBUTOS	INDICADORES DEL NIVEL DE RECUPERACIÓN		
	CORTO PLAZO 1-5 AÑOS	MEDIO PLAZO 5-15 AÑOS	LARGO PLAZO > 15 AÑOS
DIVERSIDAD ESTRUCTURAL			
Diversidad vegetal	> Diversidad taxonómica > Diversidad fenotípica	> Diversidad taxonómica > Diversidad fenotípica	≥ Diversidad taxonómica ≥ Diversidad fenotípica
Niveles tróficos presentes	≥ Diversidad de cada nivel trófico	> Diversidad de cada nivel trófico	≥ Diversidad de cada nivel trófico
Mosaico espacial	> Diversidad de manchas	> Diversidad de manchas	≥ Diversidad de manchas
FUNCIONES ECOSISTÉMICAS			
Fertilidad, productividad	Concentración normal de nutrientes en hoja > Biomasa vegetal	Concentración normal de nutrientes en hoja > Biomasa vegetal	Concentración normal de nutrientes en hoja ≥ Biomasa vegetal
Interacciones ecológicas	> Servicios de polinización	> Servicios de polinización	≥ Servicios de polinización
Resistencia, resiliencia	≥ % sp. rebrotadoras ≥ Banco de semillas	≥ % sp. rebrotadoras ≥ Banco de semillas	≥ % sp. rebrotadoras > Banco de semillas
INTERCAMBIOS EXTERNOS			
Flujos de materia y energía	< Entrada flujos negativos (fuego, sales, aguas ácidas, contaminantes)	< Entrada flujos negativos	> Salida flujos positivos (humedad, hojarasca, detritívoros, polinizadores)
Flujo génico	≤ Entrada polen/semillas no deseables	< Entrada polen/semillas no deseables	> Salida polen/semillas ecosistema de referencia
Interconexión de hábitats	> Cobertura vegetal	> Cobertura vegetal	≥ Cobertura vegetal

Tabla 1. Modelo general de atributos evaluables en una <<Rueda de Recuperación Ecológica>> con indicadores cuantitativos específicos, adaptados a un programa de seguimiento de restauraciones de área mineras en ambientes semiáridos. Los símbolos indican menor (<), menor o igual (≤), igual (=), mayor, o mayor o igual (≥) nivel de cada indicador en un estadio respecto del estadio anterior. Modificada a partir de Young et al. 2022; Navarro-Cano 2024.

3.5.2. Objetivos del seguimiento de los proyectos de restauración en la Sierra Minera

Dentro del Marco de Actuaciones Prioritarias para Recuperar el Mar Menor (MAPMM), presentado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico en 2021, se contemplan una serie de actuaciones de restauración de emplazamientos mineros peligrosos abandonados y restauración de zonas afectadas por la minería en la zona de influencia del Mar Menor. Para evaluar el resultado de estas actuaciones de restauración, iniciadas en 2023, se ha desarrollado un programa de seguimiento que usa diversos grupos biológicos como indicadores de calidad de la

restauración. El programa sigue una metodología de seguimiento y análisis BACI (de sus siglas en inglés *Before-After Control Impact*, Smith 2002). Además de muestreos regulares tras la ejecución de los programas de restauración, BACI requiere de muestreos previos de las biocenosis presentes en las áreas a restaurar, así como en las áreas próximas no restauradas, que actuarán como zonas control externas.

El plan de seguimiento persigue evaluar en el tiempo la efectividad de los proyectos de restauración de sue-

los mineros de la sierra mediante indicadores cuantitativos basados en métricas edáficas, biológicas y ecológicas. Para ello se utilizará un doble control o referencia con el que comparar la evolución de esos indicadores. Por un lado, parcelas control de la Sierra Minera, con una historia de al menos 25 años sin perturbaciones severas y, por otro lado, las propias parcelas de restauración en el estado previo a las obras.

El programa incluye el seguimiento de indicadores para la evolución de seis atributos distintos, siguiendo el modelo de la **Tabla 1:**

- a) Amenazas. Indicadores de contaminación por metales pesados en plantas y fauna edáfica, así como abundancia de especies invasoras.
- b) Condiciones ambientales. Fertilidad física del suelo, así como contenidos en carbono orgánico, macro- y micronutrientes vegetales y metales pesados,

- c) Composición de especies. Diversidad taxonómica de plantas, cobertura vegetal, nematodos, microbiota edáfica, polinizadores y aves,
- d) Diversidad estructural. Diversidad funcional de plantas, nematodos, microbiota edáfica, polinizadores y aves,
- e) Funciones ecosistémicas. Protección frente a la erosión, productividad biológica, actividad de los descomponedores,
- f) Intercambios externos. Llegada de especies de la matriz paisajística circundante.

El objetivo final es poder cuantificar si existe una mejora significativa de esos indicadores de calidad ambiental con respecto a la situación antecedente a las obras. Asimismo, se pretende determinar la trayectoria de los indicadores hacia los valores presentes actualmente en las parcelas control externas.

3.5.3. Metodología de seguimiento de los proyectos de restauración en la Sierra Minera

El programa de seguimiento y análisis BACI de la biodiversidad en las áreas restauradas tiene un horizonte inicial de 3 años. Está basado en el uso de cuatro comunidades biológicas

como bioindicadoras del efecto de la restauración de suelos mineros: comunidades vegetales, comunidad microbiana, comunidad de nematodos, polinizadores y de aves. El seguimiento incluye por tanto distintos niveles tróficos (productores primarios, descomponedores, herbívoros y depredadores) con influencia directa sobre funciones básicas para la salud de un ecosistema (descomposición de la materia orgánica, ciclado de nutrientes, fertilidad del suelo, productividad primaria, control de la erosión, estabilidad del ecosistema, movilidad de contaminantes). Por su actividad y ámbito de influencia, el seguimiento de estas cinco biocenosis nos debe informar del estado de salud de las áreas restauradas tanto a escala de parcela como en un contexto local.

El programa de seguimiento de la biodiversidad se basa en el uso tanto de variables taxonómicas como funcionales, para obtener no solo datos cuantitativos de diversidad taxonómica sino también de diversidad funcional. Asimismo, se incluyen parámetros de biodiversidad ponderados por la abundancia de cada taxón o tipo funcional, para una

mejor caracterización de la composición, estructura y función de las biocenosis muestreadas. El programa incluye seguimiento de métricas de diversidad alfa, que informan del estado de las biocenosis en la zona restaurada en un momento concreto, y diversidad beta, que informan de la evolución temporal de la zona restaurada y/o su disimilitud con respecto a zonas control. Tanto la diversidad alfa como la beta incluyen la riqueza taxonómica (número de taxones), el índice de Shannon (que incluye la riqueza y la distribución de abundancias de los taxones) y la diversidad funcional de comunidades vegetales, microbiota, nematodos edáficos, polinizadores y aves. Para el cálculo de la diversidad funcional de cada biocenosis se usa una combinación de rasgos morfológicos, fisiológicos y metabólicos que permitan caracterizar el papel de cada especie en su biocenosis.

El diseño de muestreo y seguimiento de cada área restaurada es específico del tipo de estructura minera a restaurar. Cada instalación de residuos mineros abandonados (IRMA) presenta condicionantes ambientales inherentes a su origen, localización o método de restauración aplicado. Todo ello obliga a un diseño específico del seguimiento BACI de la biodiversidad. Por ello, cada IRMA se muestreará incluyendo los distintos ambientes existentes (meseta y talud principalmente), tanto previos a la

intervención como los generados por la restauración. Por lo tanto, en el caso de aparecer cambios de orientación, pendiente o composición química significativos, éstos deben ser tenidos en cuenta de manera proporcional a la superficie ocupada. Por este motivo, se emplea un diseño de muestreo estratificado, en el que cada IRMA se divide en estratos que corresponden a ambientes con unas características determinadas. Dentro de cada estrato, se realiza un muestreo aleatorio. El diseño muestral incluye una componente espacial (con dos niveles: IRMA y CONTROL) y una componente temporal (con al menos T0, T1, T2 y T3), siendo T0 el muestreo previo al inicio de las obras y realizándose el resto de los muestreos con periodicidad anual. La ubicación de las parcelas control se ha realizado en

laderas o cumbres de lomas próximas a los IRMA, pero alejados de la influencia del agua de escorrentía generada por los mismos u otras estructuras mineras próximas. De esta manera, se ha intentado reducir al máximo el contenido en metales provenientes de estructuras mineras. El control podrá tener, no obstante, una concentración de metales por encima de los niveles genéricos de referencia para la región (Martínez-Sánchez & Pérez-Sirvent, 2007), dado el contenido en metales de los suelos por meteorización de la roca subyacente, o por contaminación eólica a partir de IRMA cercanos (Bisquert et al., 2017). En cualquier caso, las parcelas CONTROL deben haber seguido una evolución natural, sin perturbaciones antrópicas severas, durante al menos los últimos 25 años.

3.5.4. Comunidades vegetales

El seguimiento de la comunidad vegetal consta de dos componentes: comunidad implantada (CIM) y comunidad establecida silvestre (CES). El estado de la CIM en cada muestreo se realiza a partir de una muestra representativa de las especies implantadas que tenga en cuenta la heterogeneidad espacial del área restaurada. En cada CIM se estiman los siguientes parámetros: supervivencia específica, parámetros de crecimiento (altura, diámetro de copa y diámetro de tronco) y estado de salud (densidad de copa, estado reproductivo, estado nutricional, bioacumulación de metales y presencia de plagas). El tamaño muestral mínimo por especie oscila entre 100 individuos para la supervivencia ($N=100$), $N=30$ para el crecimiento y $N=5$ para el estado de salud. Debido a la imposibilidad para encontrar ejemplares silvestres de la misma edad que los implantados en los IRMA, el estado de la CIM no dispondrá de control externo al depósito, tan solo de la comparación en el tiempo de los mismos ejemplares. No obstante, se valorará el uso como control de datos preexistentes de crecimiento de las mismas especies en condiciones Mediterráneas semiáridas sobre suelo no afectado por actividades mineras (monte bajo, suelo forestal, etc.).

El estado de la CES en cada muestreo se evalúa a partir de transectos lineales de 25m, a razón de un mínimo de cinco transectos por cada unidad ambiental o estrato de muestreo (meseta, talud de solana y talud de umbría). Los transectos se distribuyen en el depósito de forma perpendicular a las curvas de nivel. En cada transecto se mide la abundancia y cobertura de especies vegetales silvestres mediante el método de interceptación lineal. Para

la estimación de la diversidad funcional se miden, en un mínimo de tres ejemplares por especie, los siguientes rasgos: altura media, altura de las estructuras de remplazo, época de floración, duración de la floración, área específica foliar, tamaño de semilla, tipo de dispersión, tipo de metabolismo, biomasa aérea, esclerofilia, xerofilia, longitud de raíces, lateralidad de raíces, biomasa de raíces y capacidad de rebrote. El estado de la CES se compara con las parcelas CONTROL.

Se han establecido ocho parcelas CONTROL en el entorno de la Sierra Minera (**Figura 1**). Todas las parcelas se sitúan en lomas elevadas en cuatro de las cinco cuencas vertientes al Mar Menor desde la Sierra. Se sitúan sobre diversos hábitats naturales representativos del paisaje vegetal de la Sierra. Se han excluido los pinares de repoblación y los hábitats litorales de zonas bajas (vegetación de playas, saladar y estepas salinas). La razón estriba en que: a) los distintos proyectos de restauración diseñados, eluden el establecimiento de vegetación arbórea o con raíces profundas para reducir el riesgo de daño y contacto de las raíces con el residuo inertizado, b) las características ambientales de los IRMA restaurados se alejan de los de los ecosistemas litorales en perfil, textura, disponibilidad hídrica, salinidad, etc., y c) los ecosistemas de referencia elegidos se aproximan más a las comunidades arbustivas, de matorral y pastizales semiáridos de la Sierra Minera, muchos de los cuáles son hábitats de interés comunitario y aportan funciones ecosistémicas de primer orden. En la **Tabla 2** se presenta una descripción básica de las ocho zonas CONTROL seleccionadas.



Figura 1. Localización de las parcelas CONTROL (C1 a C8) y parcelas sobre instalaciones de residuos mineros abandonados (cuadros verdes) establecidas hasta la fecha para el seguimiento de comunidades vegetales, microbianas y de microfauna en la sierra Minera. Los transectos de seguimiento de polinizadores se indican en azul (punto central del transecto). Los controles para el seguimiento de la avifauna se indican con un círculo blanco, mientras que en círculo verde se localizan las estaciones de seguimiento de aves sobre suelos mineros. Se indican también las áreas de restauración tanto prioritarias (polígonos verdes) como secundarias (polígonos rojos) en la Sierra Minera.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	LITOLOGÍA	ORIENTACIÓN	PENDIENTE	PH	COBERTURA VEGETAL
C1.S	Matorral-lastonar (5334, 6220*)	Micaesquistos	SE	25°	6.61	35%
C1.N	Matorral-lastonar (5334, 6220*)	Micaesquistos	NW	25°	6.02	65%
C2.S	Espartal (6220*, 5334)	Calizas	SW	30°	8.38	45%
C2.N	Espartal (6220*, 5334)	Calizas	NE	30°	8.42	55%
C3.S	Espartal (6220*, 5334)	Calizas	SE	25°	8.24	45%
C3.N	Matorral-espartal (5334, 6220*)	Calizas	N	25°	8.05	55%
C4.S	Espartal-palmitar (6220*, 5333, 8210)	Dolomías	S	20°	8.18	40%
C4.N	Lastonar-matorral (6220*, 5333, 8210)	Dolomías	NE	23°	8.04	55%
C5.S	Espartal-matorral (6220*, 5334, 8210)	Calizas	SW	25°	8.19	40%
C5.N	Lastonar-palmitar (6220*, 5333)	Calizas	NE	30°	7.89	95%

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	LITOLOGÍA	ORIENTACIÓN	PENDIENTE	PH	COBERTURA VEGETAL
C6.S	Espartal-palmitar (6220*, 5333, 8210)	Diabasas-ca-lizas	S	20°	7.94	45%
C6.N	Palmitar-lastonar (6220*, 5333)	Diabasas	N	25°	7.49	90%
C7.S	Lastonar-pinar (6220*, 5334)	Micaesquistos	W	25°	7.21	65%
C7.N	Matorral (5334)	Micaesquistos	NE	25°	7.46	45%
C8.S	Espartal-sabinar-palmitar (6220*, 9570*)	Dolomías	S	20°	7.93	40%
C8.N	Sabinar-pinar-lastonar (9570*)	Dolomías	N	20°	7.85	60%

Tabla 2. Descripción de las parcelas CONTROL y sus subparcelas de diferente orientación.

Cada parcela se ha subdividido en dos subparcelas anexas de 25 × 25m, de orientación contrastada.

En cada subparcela se ha realizado una caracterización de la presencia, abundancia y cobertura vegetal a partir de tres transectos paralelos de 25m lineales, siguiendo la misma metodología

usada para caracterizar la CES de cada parcela. Las subparcelas CONTROL se han establecido preferentemente sobre materiales carbonatados (12 de 16 subparcelas), con un pH promedio de 7.7, en laderas de pendiente media 24.6°. La cobertura vegetal oscila entre 44% en solana y 65% en umbría (**Figura 2**).

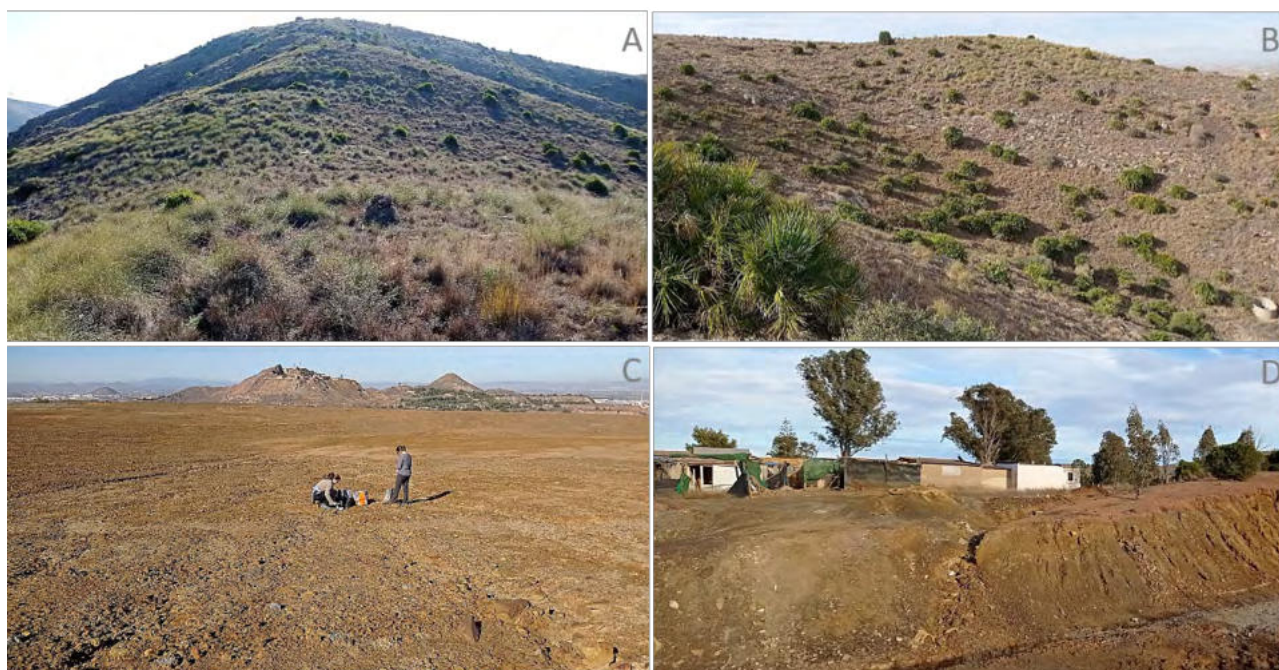


Figura 2. Imágenes de las parcelas CONTROL C5 y C3 (A, B), y dos IRMA a restaurar: Brunita (C) y Llano del Beal (D).

3.5.5. Comunidades microbianas del suelo

El seguimiento de la diversidad microbiana de los IRMA restaurados se basa en el muestreo de bacterias, arqueas y hongos presentes en la capa superficial de suelo (0-10 cm). Para ello se recolecta

una muestra de suelo por cada transecto lineal de 25m descrito en el apartado anterior para la caracterización de la CES. Cada muestra consiste en una muestra compuesta de varias submuestras recoge-

das cada 5m a lo largo del transecto. El peso mínimo por muestra es de 1.5 kg. Cada muestra homogeneizada se divide en tres submuestras usadas respectivamente para: a) el análisis de propiedades físico-químicas del suelo (humedad gravimétrica, pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico total, macro-, micronutrientes, metales y metaloides); b) la extracción de ADN para la posterior secuenciación de marcadores filogenéticos de bacterias, arqueas y hongos; c) la extracción de los nematodos del suelo mediante protocolos estándar, descritos en el apartado siguiente.

La determinación del contenido en carbono y nitrógeno total, y carbono orgánico del suelo, se realiza mediante combustión seca en un analizador elemental. Los macro-, micronutrientes y metales se analizan mediante digestión ácida y cuantificación mediante espectroscopia de emisión óptica de plasma de acoplamiento inductivo. El contenido final de cada uno de estos elementos en las muestras se expresa por gramo de suelo seco, lo que se obtiene tras corregir los valores brutos en función de la humedad gravimétrica de cada muestra.

El ADN total de cada muestra se obtiene a partir de una pequeña alícuota de suelo mediante la utilización de kits comerciales que se basan en 1. la dispersión de los agregados edáficos, la rotura de las paredes celulares y las membranas plasmáticas, 2. la eliminación de sustancias presentes en el suelo, tales como ácidos húmicos y fúlvicos, que pueden inhibir aplicaciones posteriores, 3. la separación mediante cromatografía de intercambio iónico de las moléculas de ADN de todos los organismos presentes en el suelo. Dado el bajo contenido en materia orgánica de las muestras de la Sierra, y su baja carga microbiana, se requiere la utilización de kits comerciales que permiten extraer ADN a partir de 10 gramos de suelo, cuando los kits más ampliamente utilizados trabajan con menos de medio gramo de suelo. La calidad de extractos de ADN se chequea mediante electroforesis en gel de agarosa y la concentración de ADN en cada extracto se cuantifica mediante espectrofluorometría, utilizando fluoróforos con capacidad de adsorción al ADN de doble cadena. Para cada muestra de suelo, se almacena una alícuota del extracto de ADN a -20 °C para su análisis posterior y una segunda a -80 °C para su almacenamiento a largo plazo, de tal manera que se genera un banco de material genómico de los suelos de la Sierra.

Para el análisis de la diversidad microbiana, se utilizan técnicas de secuenciación masiva. En primer

lugar, se amplifican mediante reacción en cadena de la polimerasa (PCR, de sus siglas en inglés) dos marcadores moleculares, uno característico de procariotas (bacterias y arqueas) y otro de eucariotas (hongos). Es decir, para cada uno de los miles de genomas que se encuentra en el extracto de ADN se generan millones de copias de una región específica, cuya secuencia única de nucleótidos (A, C, G, T) servirá para identificar al organismo del cual proviene. Posteriormente, se utiliza secuenciación de última generación para obtener de forma paralela y masiva, la secuencia nucleotídica de cada una de las copia de ADN. El proceso se realiza de manera que se obtengan un mínimo de 10.000 secuencias por muestra, en muchos casos hasta 100.000 secuencias por muestra, de modo que en un único proyecto de restauración se trabaja con millones de secuencias para el análisis de la microbiota edáfica. El procesamiento de todas esas secuencias de ADN requiere la utilización de herramientas bioinformáticas, todas ellas de libre distribución, para eliminar errores de secuenciación y secuencias de baja calidad, identificar el taxón microbiano al que corresponde cada secuencia, y finalmente construir matrices de comunidad en las que se representa la abundancia de cada taxón en cada muestra.

Comunidades de nematodos del suelo (1pp)

El seguimiento de la diversidad de nematodos se realiza a partir de las muestras de suelo obtenidas mediante el procedimiento descrito en el apartado anterior. Los nematodos, como casi todos los organismos edáficos, presentan una cutícula semipermeable que hace que requieran de la presencia de agua (aún en cantidades mínimas) en el suelo para desarrollar su actividad vital. Para extraer los nematodos del suelo se utilizan embudos de Baermann, dispositivos en los que la muestra de suelo se coloca sobre un tamiz situado sobre un embudo lleno de agua, de forma que los nematodos migran desde el suelo hacia el agua y son recolectados en el fondo del embudo tras 24-48h de extracción.

Una vez extraídos del suelo, se realiza el recuento de nematodos de cada muestra bajo lupa binocular, con abundancias expresadas en individuos por 100 gramos de suelo. Posteriormente se usa un mínimo de 100 nematodos de cada muestra para realizar dos asignaciones funcionales diferentes. En primer lugar, se clasifican en función de cinco categorías

tróficas principales (Yeates, 1993): los nematodos bacterívoros se alimentan de las bacterias del suelo ramoneando sobre la materia orgánica en descomposición; los nematodos fungívoros presentan estiletes bucales que les permiten perforar la pared celular de las hifas de los hongos y succionar su contenido interno; los nematodos omnívoros y predadores presentan estiletes o dientes que les permiten atravesar la pared del cuerpo de sus presas (otros nematodos u otros invertebrados del suelo); finalmente los nematodos herbívoros presentan estiletes robustos que les permiten atravesar la dura pared celular de las células vegetales y succionar su contenido interno, ya sea desde el exterior de la raíz o introduciéndose en su interior.

La segunda clasificación funcional es la clasificación en grupos Colonizador-Persistente (Bongers, 1990). Estos grupos clasifican las familias de nematodos en 5 grupos, del grupo 1 al grupo 5, en un gradiente ascendente de sensibilidad a las perturbaciones am-

bientales, de forma que los nematodos de los grupos 1 y 2 son los más resistentes a las perturbaciones ambientales, generalmente bacterívoros, y los nematodos del grupo 5 son extremadamente sensibles a las perturbaciones y son generalmente predadores. En los suelos contaminados por metales los nematodos que ocupan posiciones más altas en las redes tróficas edáficas y con valores c-p más alto tienden a desaparecer, y una adecuada restauración ecológica debe resultar en la gradual recuperación de estas comunidades.

Además de las clasificaciones funcionales, los nematodos del suelo se clasificarán hasta género o familia, en un microscopio óptico. La caracterización taxonómica de la comunidad permite aplicar métricas de biodiversidad, como los índices de diversidad de Shannon o de Simpson, que son indicadores del estado de conservación del ecosistema, así como de otras medidas de diversidad alfa y beta mencionadas en apartados anteriores.

3.5.6. Comunidades de polinizadores

Los polinizadores desempeñan un papel primordial en el funcionamiento de los ecosistemas. Muchos de ellos, especialmente los sírfidos, son buenos bioindicadores ambientales. Por ejemplo, está comprobado que determinados sírfidos son buenos indicadores de los cambios del paisaje (Popov et al., 2017). Por ello, dentro del Marco de Actuaciones Prioritarias para Recuperar el Mar Menor (MAPMM) se iniciaron en abril de 2024 estudios sistemáticos de polinizadores en el marco de los proyectos “Seguimiento de sírfidos y abejas en los proyectos de biodiversidad” de la oficina técnica del Mar Menor (Murcia) y “SPRING: *Strengthening pollinator recovery through indicators and monitoring*”.

Para el seguimiento y análisis de polinizadores en el ámbito de las actuaciones de restauración en espacios mineros en la zona de influencia del Mar Menor se realizan 9 transectos, de los cuales, dos de ellos (ESPOMS 100- “Torrecita” y ESPOMS 101- “Cabezo Mingote”) pertenecen al proyecto “SPRING” y siete pertenecen al proyecto “Seguimiento de sírfidos y abejas en los proyectos de biodiversidad” arriba mencionados (ESPOMS 200 - “Descargador”, ESPOMS 201 - “Brunita”, ESPOMS 202 - “Seto”, ESPOMS 203 - “Cítrico”, ESPOMS 204 - “Carmoli”, ESPOMS 205 - “Descargador II”, ESPOMS 206 - “Torrecita”). La localización de los transectos se indica en la Fig 3.1. Cada transecto está dividido en 10 subtransectos.

Todos y cada uno de los transectos arriba mencionados se realizan una vez al mes.

Para los dos transectos que pertenecen al proyecto “SPRING” se utilizó la metodología propia de este proyecto (SPRING consortium, 2022). Las abejas que el observador no puede identificar en vuelo son recolectadas con manga entomológica y almacenadas en un tubo de plástico lleno de alcohol 70%, se etiquetan y se envían al Gabinete de Taxonomía de “SPRING” para su identificación. Cuando se trata de especies que no pueden identificarse en vuelo, solo se captura un individuo de cada supuesta especie distinta, pero se indica, en la plantilla de muestreo, cuántos ejemplares se han observado de cada supuesta especie.

Del mismo modo que las abejas, los sírfidos son identificados directamente en vuelo, excepto en el caso de especies que requieren un diagnóstico en laboratorio, generalmente, las de los géneros *Eumerus* Meigen, 1822 y *Merodon* Meigen, 1803. En este caso, la captura se realiza con manga entomológica y el ejemplar se introduce en un tubo de plástico que se coloca en el congelador al llegar a laboratorio para sacrificar el ejemplar. Posteriormente, los ejemplares se preparan en seco, se etiquetan y se identifican. Cuando es requerido para su diagnóstico a nivel de especie,

se disecciona y prepara la genitalia masculina del ejemplar siguiendo el protocolo de Ricarte et al. (2012). La genitalia masculina es el mejor carácter taxonómico para identificar especies. Los sírfidos del género *Eumerus* se identifican con Vujić y Šimić (1995-1998) y los del género *Merodon* con Marcos-García et al. (2007). Para finalizar, se realiza el transecto de mariposas, las cuales se identifican directamente en vuelo mediante la utilización de las guías de Latasa Aso et al. (2001) y Popović y Đurić (2011). Para los siete transectos del proyecto “Seguimiento de sírfidos y abejas en los proyectos de biodiversidad”, se utilizó una metodología de “SPRING” modificada. El transecto se inicia sobre las 9 de la mañana. A lo largo del mismo transecto se van registrando todos los polinizadores de interés (abejas, sírfidos y mariposas), ya que se trata de localidades muy degradadas en las que no se espera mucha abundancia de polinizadores en general. Se registran las condiciones meteorológicas (temperatura, dirección y fuerza del viento y nubosidad) en la plantilla de muestreo. Del mismo

modo que en los transectos de SPRING, los sírfidos se identifican en vuelo, excepto los del género *Eumerus*, que se cogen con la manga entomológica, se introducen en un bote de plástico y este en el congelador, tras su llegada al laboratorio. Los ejemplares se preparan, etiquetan e identifican en laboratorio y pasan a formar parte de la colección entomológica del Mar Menor (Murcia).

En los transectos de “Seguimiento de sírfidos y abejas en los proyectos de biodiversidad”, las abejas se registran siguiendo el mismo protocolo que los sírfidos del género *Eumerus*, pero se identifican, a nivel género, con la clave específica de abejas europeas (Miches et al., 2019). Algunos ejemplares se identifican a nivel especie con la guía de campo de Aguado Martín et al. (2015) y Mudri-Stojnić et al. (2023). Todos los ejemplares recolectados forman parte de la colección entomológica del Mar Menor (Murcia). Por su parte, las mariposas son identificadas en vuelo con la guía de campo de Latasa Aso et al. (2001).



Figura 3. Izda.: Localidad Cabezo Mingote (ESPOMS 101), Región de Murcia (Foto: Javier Giménez). Dcha.: Localidad Descargador (ESPOMS 200), Región de Murcia (Foto: Zorica Nedeljković).

3.5.7. Comunidades de aves

La metodología para los trabajos de seguimiento de avifauna en la Sierra Minera está inspirada en el programa de seguimiento de aves SACRE, puesto en marcha por SEO/BirdLife en 1996. El muestreo se basa en un sistema de estaciones de escucha en 10 puntos, de forma que se cubran las necesidades de información de los distintos biotopos de las zonas de restauración y su entorno. Las distancias entre puntos de muestreo se estiman para poder cubrir el territorio sin duplicar información. Se establecen dos puntos de control en zonas sin actuación y con la vegetación natural propia de la zona.

La **Figura 1** muestra la localización de los puntos de muestreo, incluidos los puntos de control.

Para los muestreos se ha realizado una adaptación metodológica que consiste en incrementar el radio de muestreo a aproximadamente 100 m, ya que en la mayoría de los casos se trata de zonas amplias y despejadas en las que el radio de acción propuesto en la metodología SACRE (25 m) resulta escaso. Paralelamente, también se ha aumentado el tiempo de permanencia en cada una de las estaciones de muestreo, pasando de los 5 min establecidos en el programa SACRE, a los

7 min. Las estaciones de escucha se visitan siempre en las primeras horas de la mañana, aprovechando el máximo nivel de actividad de las aves.

En la toma de datos se tiene en cuenta dos tipos de observaciones. Por un lado, las aves que se han observado dentro del radio aproximado de observación de 100 m posadas y, por otro, aquellas que se han observado en vuelo atravesando el espacio. Las primeras, localizadas muchas veces por la escucha de su canto, son las que, con gran probabilidad, usan el espacio para algunas de las funciones de su ciclo vital (alimentación, descanso, nidificación...). Sin embargo, de las especies observadas en vuelo de paso no se tiene información del uso que hacen del espacio; tan solo se sabe que el punto de muestreo en-

tra dentro de su área de distribución. Excepciones a esta circunstancia se observa con algunas especies que se detectan mucho más fácilmente en vuelo y que este indica que ocupan el espacio para camppear o nidificar, es decir que su observación no es debida a un vuelo de paso. Entre éstas se incluyen el cernícalo vulgar (*Falco tinnunculus*), observado frecuentemente en vuelo cernido, y la alondra (*Alauda arvensis*), con un típico canto nupcial en la vertical de su territorio.

Las fechas para la realización de los censos anuales intentan abarcar tanto las especies nidificantes como las de paso pre y post nupcial, y las invernantes. En la **Tabla 3** se muestran las semanas elegidas para la realización de los censos.

CENSO 6		CENSO 1	CENSO 2	CENSO 3	
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
		CENSO 4		CENSO 5	
JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4

Tabla 3. Periodos en los que se sitúan las fechas previstas para los censos. En verde los censos planteados según SACRE. En azul los censos para abarcar el resto de la fenología.

3.5.8. Análisis de datos

Los valores estimados de la diversidad de plantas, microbiota edáfica y nematodos indicadores del estado de la restauración son analizados mediante dos aproximaciones:

- Para cada área restaurada en un mismo tiempo T_n , los valores de las distintas réplicas (transectos) de cada métrica de diversidad se comparan con los valores CONTROL promedio mediante modelos lineales generalizados, en el que se usan los parámetros físico-químicos del suelo como covariables. De esta manera evaluamos si el área restaurada ha alcanzado la diversidad de las áreas control.
- Para ver el efecto del tiempo, se compara cada métrica de diversidad en el tiempo T_n con el valor en el muestreo siguiente T_{n+1} . Para ello se usan modelos lineales generalizados mixtos, con la parcela como factor aleatorio y los parámetros

físico-químicos del suelo como covariables. De esta manera evaluamos si ha habido una mejora significativa de la diversidad con respecto a la situación antecedente.

Los valores estimados de supervivencia específica, crecimiento y estado de salud para la comunidad de plantas introducidas (CIM) se analizan igualmente mediante las dos aproximaciones planteadas, ajustando cada modelo lineal generalizado a la naturaleza de los datos en cada caso mediante la especificación del tipo de distribución de errores.

Con el paso del tiempo, se podrá trazar la trayectoria de la diversidad de cada área muestreada mediante curvas de regresión, y estimar mediante extrapolación el tiempo necesario para alcanzar los valores CONTROL promedio.

En lo que se refiere al análisis de los datos de diversidad de aves, obtenidos siguiendo su propio diseño muestral, se calculan los valores de abundancia y diversidad de cada muestreo en comparación con las dos parcelas control. Para el análisis de diversidad se utiliza un criterio diferente al usado para el análisis de la abundancia. En este caso si se contabiliza el total de especies observadas, tanto en vuelo como posadas. Este criterio no se ha considerado para la abundancia al haber relacionado este parámetro con el uso del territorio. En el caso de la

diversidad se evalúa la diversidad alfa, que indica el número de especies distintas para cada uno de los puntos de muestreo, la diversidad gamma, que indica el número total de especies en un territorio con varias localidades y la diversidad beta, que representa el cociente entre gamma y la media de las diversidades alfa. El análisis mediante regresión de la diversidad y abundancia de cada censo o de cada año en el tiempo permitirá comparar la evolución de cada área restaurada en el tiempo, así como con respecto a los controles establecidos.

3.5.9. Resultados preliminares

Disponemos de algunos datos sobre la situación de partida de algunos grupos usados como bioindicadores previa al inicio de las obras de restauración. Estos datos muestran claras diferencias en riqueza o abundancia de algunos de estos grupos (nematodos, polinizadores y aves) al comparar la información obtenida en parcelas control en comparación con las de suelos de minería.

Los primeros resultados sobre la abundancia de nematodos del suelo en parcelas control y en dos de los IRMA proyectados en el T0, previo al inicio de las obras muestran una reducida abundancia de este grupo de microfauna edáfica en los IRMA, en comparación con las parcelas CONTROL (Figura 4).

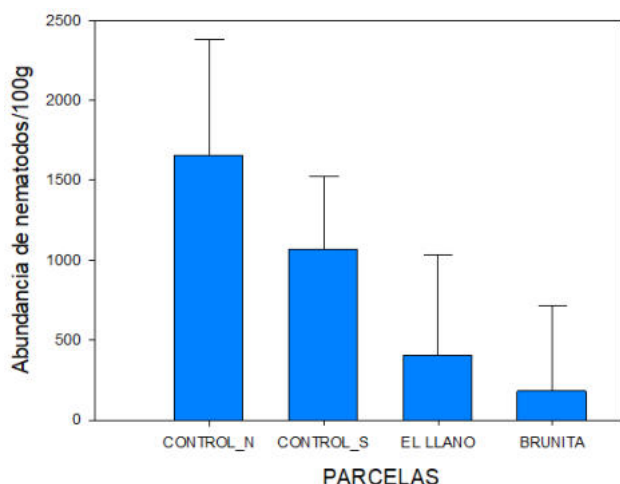


Figura 4. Abundancia media ($\pm$ Desviación estándar) de nematodos en el suelo en las parcelas control orientadas al N, las de orientación S y dos de los IRMA con restauración proyectada.101), Región de Murcia (Foto: Javier Giménez). Dcha.: Localidad Descargador (ESPOMS 200), Región de Murcia (Foto: Zorica Nedeljković).

Entre abril y junio de 2024, se registraron un total de 32 especies de abejas (Fam. Andrenidae-*Andrena* sp., *Andrena bicolor* Fabricius, 1775, *Andrena sardoa*

Lepeletier, 1841, *Flavipanurgus venustus* (Erichson, 1835), *Flavipanurgus* sp., *Panurgus* sp., Fam. Apidae-*Amegila* sp., *Anthophora retusa* (Linnaeus, 1758), *Apis mellifera* Linnaeus, 1758, *Ceratina cyanea* (Kirby, 1802), *Eucera* sp., *Eucera clypeata* Erichson, 1835, *Melecta luctuosa* (Scopoli, 1770), *Thyreus ramosus* (Lepeletier, 1841), *Xylocopa violacea* (Linnaeus, 1758); Fam. Colletidae - *Colletes* sp., *Colletes cunicularis* (Linnaeus, 1761), *Hylaeus* sp.; Fam. Halictidae - *Halictus* sp., *Halictus scabiosae* (Rossi, 1790), *Lasioglossum* sp., *Lasioglossum immunitum* (Vachal, 1895), *Nomiapis* sp., *Nomiapis bispinosa* (Brullé, 1832); Fam. Megachilidae - *Anthidium* sp., *Anthidium florentinum* (Fabricius, 1775) (Fig. 3.5), *Megachile* sp., *Megachile apicalis* Spinola, 1808, *Megachile pilidens* Alfken, 1924, *Pseudoanthidium scapulare* (Latreille, 1809), *Rhodanthidium stricticum* (Fabricius, 1787); Fam. Melittidae- *Melitta* sp.), 16 de sírfidos (*Chrysotoxum intermedium* Meigen, 1822 (Fig. 3.5), *Episyrphus balteatus* (De Geer, 1776), *Eristalis tenax* (Linnaeus, 1758), *Eumerus pusillus* Loew, 1848, *Eupeodes corollae* (Fabricius, 1794), *Melanostoma scalare* (Fabricius, 1794), *Paragus bicolor* (Fabricius, 1794), *Paragus hyalopteri* Marcos-García & Rojo, 1994, *Paragus tibialis* (Fallén, 1817), *Sphaerophoria rueppellii* (Wiedemann, 1820), *Sphaerophoria scripta* (Linnaeus, 1758), *Syricta pipiens* (Linnaeus, 1758), *Xanthogramma marginale* (Loew, 1854) (Fig. 3.5), *Merodon luteihumerus* Marcos-García, Vujić & Mengual, 2007, *Merodon geniculatus* Strobl, 1909, *Syrphus vitripennis* Meigen, 1822), y 11 de mariposas (Fam. Pieridae - *Pieris brassicae* (Linnaeus, 1758); Fam. Hesperidae - *Thymelicus lineola* (Ochsenheimer, 1808); Fam. Lycaenidae - *Lycaena* sp., *Satyrion spini* Denis & Schiffermüller, 1775; Fam. Papilionidae - *Papilio machaon* Linnaeus, 1758, *Papilio podalirius* Linnaeus, 1758; Fam. Nymphalidae - *Vanessa atalanta* (Linnaeus, 1758), *Vanessa cardui* (Linnaeus, 1758), *Danaus chrysippus* (Linnaeus, 1758), *Lasiommata maera* (Linnaeus, 1758), Fam. Pyralidae - *Titanio pollinaris*) en las localidades estudiadas.



Figura 5. De izda. a dcha. *Anthidium florentinum* (Foto: Javier Giménez), *Chrysotoxum intermedium* (Foto: Antonio Ricarte), *Xanthogramma marginale* (Foto: Antonio Ricarte).

El transecto ESPOMS 203 (“Cítrico”) es el que mayor diversidad de todos los grupos polinizadores ha demostrado tener (Figura 6). De los sírfidos registrados, dos especies son Vulnerables (*Merodon luteihumerus* y *Paragus hyalopteri*) y una está Casi Amenazada (*Merodon geniculatus*) según el Libro Rojo Europeo de los Sírfidos (Vujić et al., 2022).

Según el reciente catálogo de las abejas de la Región de Murcia (Catarineu et al., 2023) y asumiendo la correcta identificación de las especies halladas en los transectos, ocho especies de las encontradas serían nuevas para la Región de Murcia: *Andrena sardoa*, *Flavipanurgus venustus*, *Pseudoanthidium scapulare*, *Nomiapis bispinosa*, *Lasyglossum immunitum*, *Melecta luctuosa* y *Colletes canicularis*. Entre los géneros de abejas encontrados, destaca *Flavipanurgus* por ser endémico de la Península Ibérica.

En cuanto a los sírfidos y teniendo en cuenta el catálogo español de Ricarte y Marcos García (2017), cuatro de las especies encontradas son primeras citas para la Región de Murcia: *Merodon geniculatus* (en ESPOMS 100), *Merodon luteihumerus* (ESPOMS 101), *Paragus hyalopteri* (en ESPOMS 203), *Eumerus pusillus* (en ESPOMS 205 y ESPOMS 200) y *Sphaerophoria rueppellii* (en ESPOMS 204). En cuanto al *M. luteihumerus* registrado, es de destacar la fenología y comportamiento de este observado en campo, que parecen diferir con los de esta misma especie en otras partes de España (Ricarte, 2008). Se está estudiando detalladamente la morfología y genética de la especie encontrada para clarificar su estatus taxonómico (Zorica Nedeljković et al., en preparación).

En lo que respecta a las mariposas, *Danaus chrysippus* es primera cita para la Región de Murcia (Palacios y Abad, 2010; Ortiz et al., 2007, 2010).

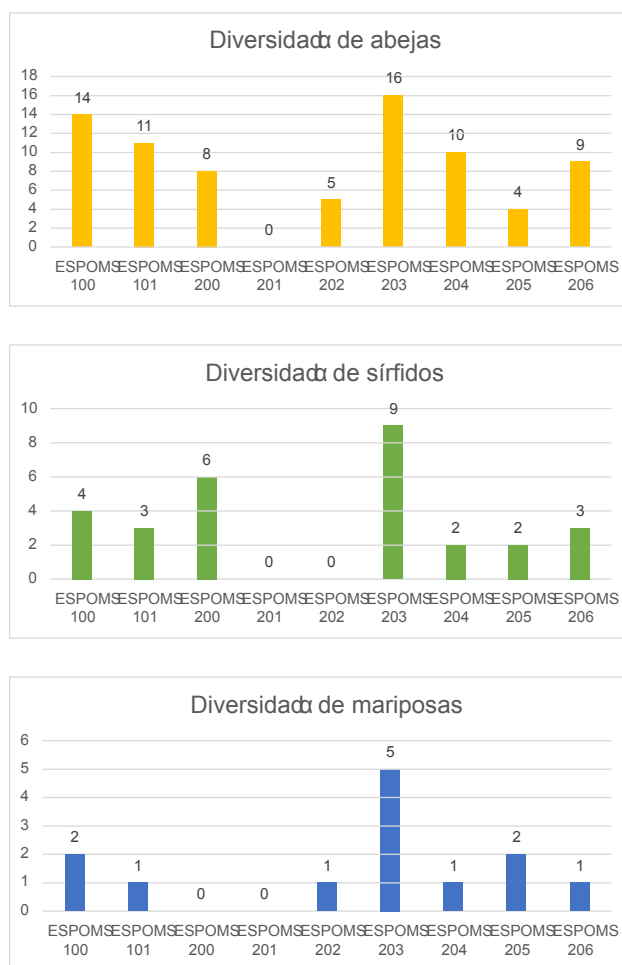


Figura 6. De arriba abajo Diversidad α de abejas, sírfidos y mariposas en la zona de estudio.

Por último, la riqueza de aves en el primer censo realizado en noviembre de 2022 mostró una mayor riqueza en las dos parcelas control en comparación con los suelos de minería (Figura 7). La riqueza se redujo aproximadamente a la mitad en suelos mineros. Si bien, llegó a ser nula en algún caso como el del IRMA Brunita. En la Figura 3.8 se muestran imágenes de algunas de las especies observadas durante los censos de 2022 y 2023.

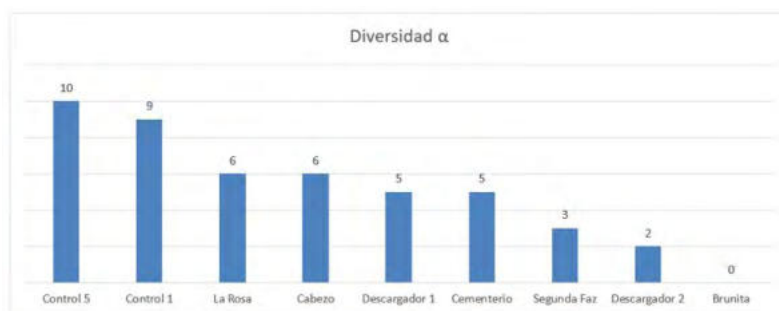


Figura 7. Datos de riqueza de aves (diversidad α) observada en el censo realizado el 17 de noviembre de 2022.



Figura 8. Imágenes de aves de la zona realizadas durante los censos. De izquierda a derecha y de arriba abajo: verderón común (*Chloris chloris*), jilguero europeo (*Carduelis carduelis*), pardillo común (*Linaria cannabina*), águila real (*Aquila chrysaetos*), curruca cabecinegra (*Sylvia melanocephala*), mito común (*Aegithalos caudatus*), cogujada común (*Galerida cristata*), alcaudón real (*Lanius meridionalis*), mochuelo europeo (*Athene noctua*), serín verdeceño (*Serinus serinus*), collalba rubia (*Oenanthe hispanica*), pollos de alcaraván común (*Burhinus oedicnemus*), alcaudón común (*Lanius senator*), tarabilla europea (*Saxicola rubicola*) y collalba negra (*Oenanthe leucura*).

Bibliografía

- Aguado Martín, L. Ó., Fereres Castiel, A., Viñuela Sandoval, E. (2015): Guía de campo de los polinizadores de España. Syngenta. 340pp.
- Arranz González, J.C., Rodríguez Gómez, V., Rodríguez Pacheco, R., Fernández Naranjo, F.J., Vadillo Fernández, L., y Alberruche del Campo, E. 2019. Guía para la rehabilitación de instalaciones abandonadas de residuos mineros. Ministerio para la Transición Ecológica. 644 p.
- Bibby, C.J., Burgess, N.D., Hill, D.A. y Mustoe, S.H. (2000). Bird Census Techniques. Academic Press. Este libro ofrece una guía completa sobre técnicas de censo de aves, incluyendo cómo utilizarlas en programas de monitoreo de restauración.
- Bisquert, D. S., Castejón, J. M. P., & Fernández, G. G. (2017). The impact of atmospheric dust deposition and trace elements levels on the villages surrounding the former mining areas in a semi-arid environment (SE Spain). *Atmospheric Environment*, 152, 256-269.
- Bongers, T. (1990). The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 83, 14-19.
- Catarineu, C., Ortiz-Sánchez, F.J. (2023): Checklist Preliminar de las Abejas de la Región de Murcia (Hymenoptera: Apoidea: Anthophila). Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa (S.E.A.), 73: 57-64.

- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., ... & Dixon, K. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. *Restoration Ecology*, 27(S1), S1-S46.
- Latasa Asso, T., Pérez Moreno, I., Sánchez Garzón, A. (2001): Trabajo de campo de Lepidópteros y Coleópteros del Parque Natural Sierra de Cazorla (La Rioja). CEIP, Logroño. 164pp.
- Laughlin, D. C. (2014). Applying trait-based models to achieve functional targets for theory-driven ecological restoration. *Ecology Letters*, 17(7), 771-784.
- Lindenmayer, D.B. y Likens, G.E. (2010). Effective Ecological Monitoring. CSIRO Publishing. Este libro aborda la importancia del monitoreo ecológico efectivo en programas de restauración y cómo las aves pueden ser utilizadas como indicadores clave en este proceso.
- Marcos-García, M.A., Vujić, A., Mengual, X. (2007): Revision of Iberian species of the genus *Merodon* (Diptera: Syrphidae). *Eur. J. Entomol.*, 104: 531-572.
- Martínez-Sánchez MJ, Pérez-Sirvent C. 2007. Niveles de fondo y niveles genéricos de referencia de metales pesados en suelos de la Región de Murcia. Universidad de Murcia. Consejería de Desarrollo Sostenible y Ordenación del Territorio. Murcia, Spain. DL: MU 1568-2007. ISBN: 978-84-9609-014-3.
- Michez, D., Rasmont, P., Terzo, M., Vereecken, N. (2019): Hymenoptera of Europe I. Bees of Europe. N.A.P. Editions. 547pp.
- Montoya, D., Rogers, L., & Memmott, J. (2012). Emerging perspectives in the restoration of biodiversity-based ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution*, 27(12), 666-672.
- Mudri-Stojnić, S., Michez, D., Rosa, P., Tot, T., Likov, L., Ranković, M., Radenković, S. (2023): Terenski priručnik za monitoring pčela (Hymenoptera: Anthophila) u Srbiji. Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Novom Sadu. 131pp.
- Navarro-Cano JA. 2024. Bloque temático 11: Formaciones de pastizal y matorral Mediterráneas. En: MANUAL DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA I Conocimiento, experiencias prácticas y lecciones aprendidas. Ed. Fundación Biodiversidad. 86-94. En prensa.
- Navarro-Cano JA, Goberna M, Valiente-Banuet A, Verdú M. 2017. Restauración ecológica en ambientes semiáridos: recuperar las interacciones biológicas y las funciones ecosistémicas. 158 pp. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. NIPO: 059-17-057-4.
- Nelson, C.R., Hallett, J.G., Romero Montoya, A.E., Andrade, A., Besacier, C., ... & Weidlich, E.W.A. 2024. Standards of practice to guide ecosystem restoration – A contribution to the United Nations Decade on Ecosystem Restoration 2021-2030. Rome, FAO, Washington, DC, SER & Gland, Switzerland, IUCN CEM. <https://doi.org/10.4060/cc9106en>.
- Ortiz, A.S., Garre, M., Guerrero, J.J., Rubio, R.M., de la Calle, J.A. (2010): Nuevos datos sobre los macrolepidópteros (Lepidoptera) del Sureste de la Península Ibérica. *Boln. Asoc. esp. Ent.*, 34 (1-2): 123-143.
- Palacios, J.L., Abad, C. (2010): Lepidoptera de la Sierra de las Moreras (Murcia, España) (Insecta: Lepidoptera). *SHILAP Revta. lepid.*, 38 (151): 257-266.
- Parra, E. (2014). Aves silvestres como bioindicadores de contaminación ambiental y metales pesados. *CES Salud Pública*, 5(1), 59-69.
- Popov, S., Miličić, M., Diti, I., Marko, O., Sommaggio, D., Markov, Z., Vujić, A. (2017): Phytophagous hoverflies (Diptera: Syrphidae) as indicators of changing landscapes. *Community Ecology*, 18: 287-294.
- Popović, M., Đurić, M. (2011): Dnevni leptiri Srbije. Priručnik. HabiProt, Beograd. 199pp.
- Ricarte, A., Nedeljković, Z., Rotheray, G.E., Lyszkowski, R.M., Hancock, E.G., Watt, K., Hewitt, S.M., Horsfield, D., Wilkinson, G. (2012): Syrphidae (Diptera) from the Greek island of Lesbos, with description of two new species. *Zootaxa*, 3175: 1-23.
- Ricarte, A. (2008): Biodiversidad de sírfidos (Diptera: Syrphidae) y conservación de los hábitats en el Parque Nacional de Cabañeros, España. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.
- Ricarte, A, Marcos-García, M.A. (2017): A checklist of the Syrphidae (Diptera) of Spain, Andorra and Gibraltar. *Zootaxa*, 4216 (5): 401-440.
- Ruiz-Jaen M.C., Aide T.M. 2005. Restoration success: how is it being measured? *Restoration Ecology*, 13, 569-577.
- Society for Ecological Restoration (SER) International & Policy Working Group. 2004. The SER International Primer on Ecological Restoration. www.ser.org & Tucson: SER International.
- Society for Ecological Restoration International (SER). 2005. Guidelines for Developing and Managing Ecological Restoration Projects. www.ser.org & Tucson: SER International.
- Smith, E. P. (2002). BACI design. *Encyclopedia of Environmental Metrics*, 1, 141-148.
- SPRING Minimum Viable Scheme Pilot: Site Survey Guidance (vers. April 2022).

- Vujić, A. & Šimić, S. (1995–1998): Genus *Eumerus* Meigen, 1822 (Diptera: Syrphidae) in area of former Yugoslavia. *Glasnik prirodnjačkog muzeja u Beogradu*, B 49–50, 173–190.
- Vujić, A., Gilbert, F., Flinn, G., Englefield, E., Ferreira, C.C., ..., and Vrba J. (2022): Pollinators on the edge: our European hoverflies. The European Red List of Hoverflies. Brussels, Belgium: European Commission.
- VV.AA. 1998. Restauración Hidrológico-Forestal de Cuencas y Control de la Erosión. Tragsa-Tragsatec-Ministerio de Medio ambiente-Mundi-Prensa, Madrid. 945 pp.
- Wainwright, C. E., Staples, T. L., Charles, L. S., Flanagan, T. C., Lai, H. R., ... & Mayfield, M. M. (2018). Links between community ecology theory and ecological restoration are on the rise. *Journal of Applied Ecology*, 55(2), 570-581.
- Yeates, G. W., Bongers, T., de Goede, R. G. M., Freckman, D. W., & Georgieva, S. S. (1993). Feeding habits in soil nematode families and genera- An outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*, 25(3), 315–331.
- Young, R. E., Gann, G. D., Walder, B., Liu, J., Cui, W., Newton, V., ... & Dixon, K. (2022). International principles and standards for the ecological restoration and recovery of mine sites. *Restoration Ecology*, 30, e13771.

3.6. Participación, información y toma de decisiones. Integración de las soluciones planteadas por distintos actores

AUTORES: Nadia García Ruiz, Jaime Talavera Sánchez, Juan Manuel Domingo (Grupo TRAGSA. Delegación Murcia). Francisco Guil Celada, María Degania Medina Vidal (MITECO).

3.6.1. Desarrollo de los proyectos y obligaciones de información pública: desde el MAPMM a la línea 2.3. y su declaración de interés general

El Marco de Actuaciones Prioritarias se elaboró bajo la premisa de que la recuperación del Mar Menor debe partir de la aceptación de cuatro puntos básicos:

- 1) Escuchar a la ciencia
- 2) Respetar y aplicar la ley
- 3) La participación pública
- 4) La cooperación interadministrativa

El mes de noviembre de 2021 el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico abrió el proceso de participación pública sobre Marco de Actuaciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor con el objetivo de recabar la opinión de todos los agentes y ciudadanos interesados en contribuir con sus aportaciones al Marco de actuaciones prioritarias para la recuperación del Mar Menor.

Los resultados de la consulta se recogieron en un informe sintético con las aportaciones realizadas, específicamente aquellas que están en el ámbito de las actuaciones del Marco de Actuaciones Prioritarias.

Dada la necesidad de que los distintos agentes se implicaran en la búsqueda de soluciones para lograr la recuperación del Mar Menor, se mantuvo dialogo social permanente con entidades representantes de la sociedad civil del Campo de Cartagena. Asimismo, se continuó dialogando con los actores económicos y otros actores sociales que pudieran contribuir en el desarrollo de las propuestas que se pusieron en marcha por el MITECO.

Con el objetivo de servir de foro de conocimiento y fomentar el diálogo entre todos los agentes implicados en la recuperación del Mar Menor, se trabajó tendien-

do puentes entre los sectores anteriores junto a los científicos y otros colectivos, en aras de mantener un diálogo fluido, y siempre desde la pluralidad, multidisciplinariedad e independencia. Así, se fomentó tanto la participación de expertos y científicos de la Región de Murcia como de otros lugares del territorio español y del ámbito internacional cuyas investigaciones se desarrollaron o hayan desarrollado en sistemas semejantes al Mar Menor y su cuenca vertiente. Para mejorar la participación social en las medidas de soluciones basada en la naturaleza se apoyaron en programas educativos y redes de profesionales en la materia.

La página web del MITECO abrió un espacio específico dedicado a los distintos procesos de consulta pública relacionados con la recuperación del Mar Menor y las líneas de acción definidas en el Marco de Actuaciones Prioritarias, y otros de interés.

Tras este proceso de participación pública se analizaron con ánimo integrador las propuestas aportadas y justificadas por todos los que intervinieron en el proceso y se descartó la incorporación de aquellas propuestas que correspondían al ámbito competencial de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia o a la administración local. Asimismo, se desestimaron aquellas propuestas que no correspondían a este Marco de Actuaciones Prioritarias y a los objetivos que se pretendían.

De las distintas líneas que conforman el MAPMM nos centramos en este punto en la Medida 2. Restauración y mejora ambiental en el ámbito de la cuenca del Mar Menor. Soluciones basadas en la naturaleza y concretamente en el apartado 2.3. Actuaciones de restauración de emplazamientos mineros peligrosos

abandonados y restauración de zonas afectadas por la minería en la zona de influencia del Mar Menor. Tras el estudio de las aportaciones realizadas se sacaron las siguientes conclusiones y datos:

- Se priorizará la retirada o tratamiento de los residuos mineros ubicados en entornos urbanos y periurbanos y los localizados en las proximidades de cauces, valorando además el sellado de pozos y balsas.
- Se priorizarán las actuaciones en función de los impactos sobre la salud, la peligrosidad de las instalaciones y la afección a la laguna.
- En los procedimientos de adquisición de los terrenos contaminados se analizará la repercusión de costes de la restauración.

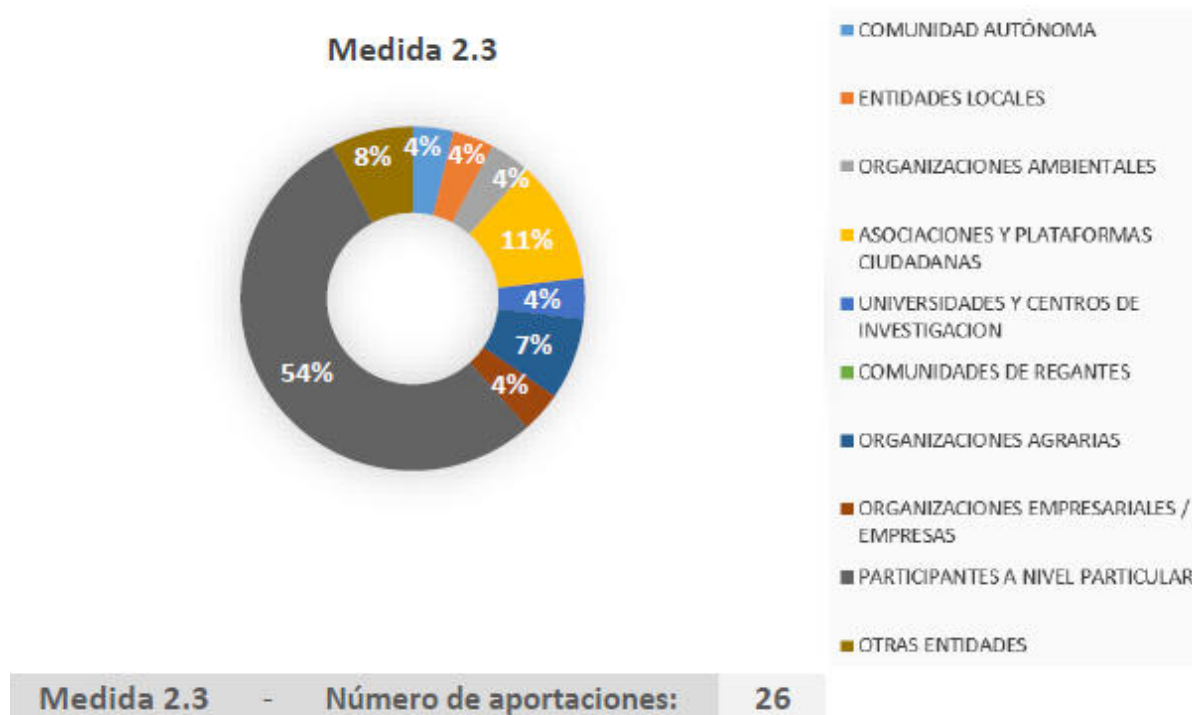


Figura 1. Gráfico de las aportaciones recibidas sobre la medida 2.3. del MAPMM.

Por otro lado, el Real Decreto-ley 27/2021, de 23 de noviembre, por el que se prorrogan determinadas medidas económicas para apoyar la recuperación, en concreto en su Disposición adicional segunda, declaró de interés general determinadas obras de protección y recuperación ambiental del Mar Menor, especificando que:

1. "Se declaran de interés general de la Administración General del Estado las siguientes obras de protección y recuperación ambiental del Mar Menor:
 - a) Restauración de ecosistemas en franja perimetral del Mar Menor y creación del Cinturón Verde.
 - b) Restauración de emplazamientos mineros peligrosos abandonados y restauración de zonas afectadas por la minería en la zona de influencia al Mar Menor.
 - c) Renaturalización y mejora ambiental de las ramblas y creación de corredores verdes que doten de conectividad a toda la red de drenaje, en especial en las ramblas afectadas por la minería.
 - d) Renovación de la impulsión de la rambla del Albujón.
 - e) Actuaciones de corrección hidrológica y laminación de crecidas asociadas a las áreas de riesgo potencial significativo de inundación de la cuenca vertiente del Mar Menor.
2. Las obras incluidas en esta disposición llevarán implícita la declaración de utilidad pública y de urgencia a los efectos previstos en los artículos 9, 10, 11 y 52 de la Ley de 16 de diciembre de 1954, de Expropiación Forzosa.
3. Las obras incluidas en esta disposición se financiarán con cargo al Presupuesto de gastos del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico".

Marco legislativo que regula los proyectos incluidos en la línea 2.3:

La Ley 21/2013, de 9 de diciembre en cuyo Apartado 2 del Artículo 7: Ámbito de aplicación de la evaluación de impacto ambiental dice lo siguiente:

Serán objeto de una Evaluación de impacto ambiental ordinaria los siguientes proyectos:

- a) *Los comprendidos en el anexo I, así como los proyectos que, presentándose fraccionados, alcancen los umbrales del anexo I mediante la acumulación de las magnitudes o dimensiones de cada uno de los proyectos considerados.*

En el Anexo I, Proyectos sometidos a la evaluación ambiental ordinaria regulada en el título II, capítulo II, sección 1ª, el Grupo 9. Otros proyectos, dice en su apartado b) *Cualquier proyecto que suponga un cambio de uso del suelo en una superficie igual o superior a 100 ha.*

Las actuaciones previstas en el principal proyecto que forma parte de la línea 2.3. **REMEDIACIÓN AMBIENTAL DE RESIDUOS MINEROS Y EMPLAZAMIENTOS AFECTADOS POR LA MINERÍA EN LOS TT.MM DE CARTAGENA-LA UNIÓN**, implica un cambio de uso del suelo en una superficie superior a 100 ha.

Por tanto, la tramitación que siguió el Proyecto es una **EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL ORDINARIA**.

Por otro lado, según la Sección 1ª *"Procedimiento de evaluación de impacto ambiental ordinaria para la formulación de la declaración de impacto ambiental"*

1. *La evaluación de impacto ambiental ordinaria constará de los siguientes trámites:*
 - a) *Elaboración del estudio de impacto ambiental por el promotor.*
 - b) *Sometimiento del proyecto y del estudio de impacto ambiental a información pública y consultas a las Administraciones Públicas afectadas y personas interesadas, por el órgano sustantivo.*
 - c) *Análisis técnico del expediente por el órgano ambiental.*
 - d) *Formulación de la declaración de impacto ambiental por el órgano ambiental.*
 - e) *Integración del contenido de la declaración de impacto ambiental en la autorización del proyecto por el órgano sustantivo.*

2. *Con carácter potestativo, el promotor podrá solicitar, de conformidad con el artículo 34, que el órgano ambiental elabore el documento de alcance del estudio de impacto ambiental. El plazo máximo para su elaboración es de dos meses.*

Una vez elaborado el proyecto y el estudio de impacto ambiental del proyecto macro denominado "Remediación ambiental de residuos mineros y emplazamientos afectados por la minería en los TT. MM. de Cartagena - La Unión" con fecha 27 de diciembre de 2022, la Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación somete a información pública el proyecto en el BOE.

Además, como se indica en el apartado b) citado anteriormente se realizan las pertinentes consultas a las Administraciones Públicas afectadas y personas interesadas, remitiendo oficios con fecha 9 de enero de 2023 para que puedan aportar las consideraciones u observaciones que estimen oportunas al proyecto.

Finalizado el plazo de información pública y consultas se realizó INFORME DE ANÁLISIS DE LAS APORTACIONES Y RESPUESTAS A CONSULTAS REALIZADAS EN EL PROCESO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL ORDINARIA del cual se obtuvieron las siguientes conclusiones y datos:

1) **Aportaciones recibidas de personas físicas y de organismos públicos:**

COORDINADORA PARA LA CONSERVACIÓN Y RECUPERACIÓN DE LA SIERRA Y LA BAHÍA DE PORTMÁN

AAVV "SANTA BÁRBARA" LLANO DEL BEAL. CARTAGENA

AYUNTAMIENTO CARTAGENA

AYUNTAMIENTO LA UNIÓN

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TÉCNICOS Y GRADOS EN MINAS Y ENERGÍA DEL SURESTE

COMISARÍA DE AGUAS (CHS)

DG AGUA (CARM)

DG DE ENERGÍA Y ACTIVIDAD INDUSTRIAL Y MINERA (CARM)

DG DE ENERGÍA Y ACTIVIDAD INDUSTRIAL Y MINERA (CARM)

DG DE SALUD PÚBLICA Y ADICCIONES (CARM)
DG MAR MENOR (CARM)
DG MEDIO NATURAL. SERVICIO DE FOMENTO DEL MEDIO AMBIENTE Y CAMBIO CLIMÁTICO (CARM)
DG SALUD PÚBLICA (AGE)
DG TERRITORIO Y ARQUITECTURA (CARM)
DIRECCIÓN GENERAL DE PATRIMONIO CULTURAL (CARM)
FEDERACIÓN DE ASOCIACIONES DE VECINOS DE CARTAGENA Y COMARCA (FAVCAC)
FUNDACIÓN SIERRA MINERA
INSTITUTO DE TURISMO DE LA REGIÓN DE MURCIA
INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA "IGME-CSIC"
OFICINA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA (CHS)
SUBDIRECCIÓN GENERAL DE MINAS (AGE)
UNIVERSIDAD DE MURCIA

2) Principales temáticas planteadas en las aportaciones presentadas:

- 1) Ampliación de la superficie de actuación
- 2) Ampliación de los apartados incluidos en el Estudio de Impacto Ambiental
- 3) Arqueología y Patrimonio
- 4) Preservar y no afectar determinadas zonas del proyecto
- 5) Modificaciones en las soluciones proyectadas
- 6) Modificaciones en las obras complementarias proyectadas
- 7) Incluir el control de la estabilidad de los depósitos en el proyecto
- 8) Mayor comunicación con otras administraciones y asociaciones
- 9) Comprobar la correspondencia con otros usos de los terrenos
- 10) Consideraciones legales
- 11) Evitar la llegada de contaminantes a los núcleos de población
- 12) Destacar los efectos positivos del proyecto sobre las masas de agua
- 13) Propuestas de correcciones en textos del proyecto
- 14) Valoración de las expropiaciones

Frecuencia temáticas alegaciones

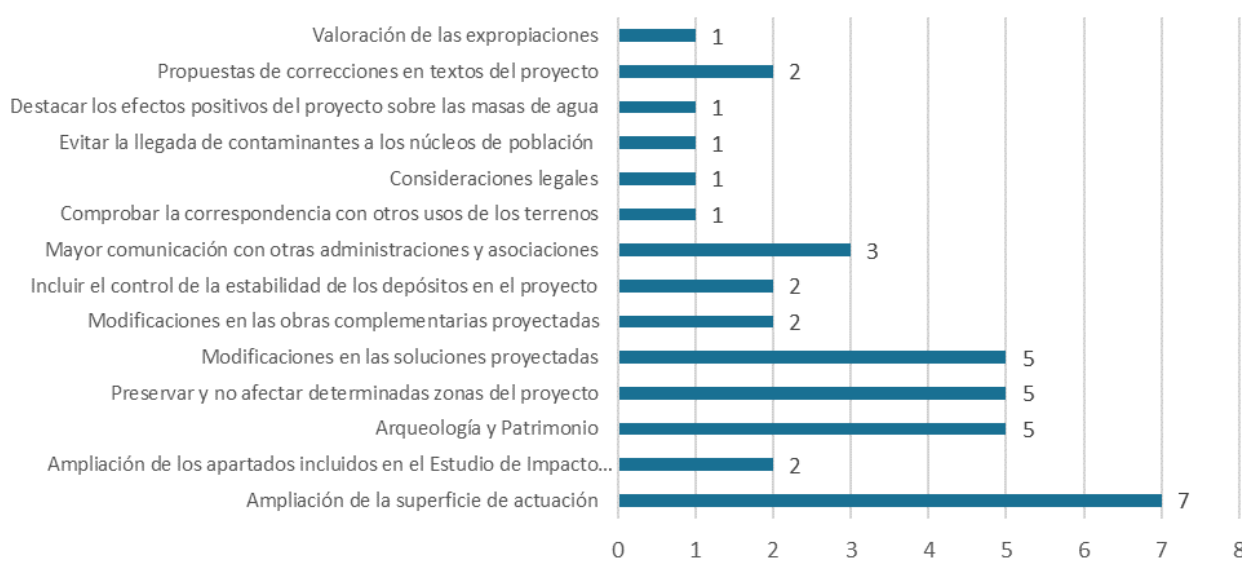


Figura 2. Frecuencia de los temas presentados en las alegaciones.

3) Tras la revisión detallada de las alegaciones y propuestas recibidas se realiza la siguiente tabla:

ALEGACIONES RECIBIDAS	22
PROPUESTAS RECIBIDAS	143
ESTIMADAS	39
PARCIALMENTE ESTIMADAS	4
DESESTIMADAS	89
COMENTARIOS	11

Tabla 1. Alegaciones y propuestas recibidas en el proyecto “Remediación ambiental de residuos mineros y emplazamientos afectados por la minería en los TT. MM. de Cartagena - La Unión.

Una vez incluidas en el proyecto las aportaciones que se consideraron estimadas en dicho proceso de información pública y consultas, el proyecto se remitió al órgano ambiental para el análisis técnico del mismo.

Con fecha 6 de diciembre de 2023 se publicó en el BOE “Resolución de 22 de noviembre de 2023, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, por la que se formula declaración de impacto ambiental del proyecto «Remediación ambiental de residuos mineros y emplazamientos afectados por la minería en Cartagena-La Unión».

La DIA es un informe preceptivo y determinante del órgano ambiental con el que finaliza la evaluación de impacto ambiental ordinaria, que evalúa la integración de los aspectos ambientales en el Proyecto y determina las condiciones que deben establecerse para la adecuada protección del medio ambiente y de los recursos naturales.

Como resultante del proceso descrito en este apartado, se redactan los proyectos constructivos recogidos dentro de las actuaciones del proyecto general indicado, donde se han incorporado las medidas

correctoras señaladas en la citada Declaración de Impacto Ambiental.

La Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación en su condición de órgano promotor y sustantivo tramita el proyecto de «Remediación ambiental de residuos mineros y emplazamientos afectados por la minería en Cartagena-La Unión» administrativamente por fases y por proyectos de ejecución según los 9 conjuntos que forman parte del citado proyecto.

Por ello, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 82 de la Ley 39/2015, de 1 de octubre, del Procedimiento Administrativo Común de las Administraciones Públicas, se somete a consideración de las administraciones públicas que tienen competencias en el ámbito de los proyectos de ejecución de los distintos conjuntos, para que formulen las observaciones que se estimen oportunas en relación con el mismo.

Una vez estudiadas las consideraciones presentadas por las administraciones públicas en el trámite de audiencia de los distintos proyectos de ejecución, estas se incorporarán en el proyecto resultando una nueva y definitiva versión del proyecto.

3.6.2. Procesos participativos e integración de soluciones planteadas por diferentes actores

Procesos participativos

Además del sometimiento de los proyectos y del estudio de impacto ambiental a información pública y consultas a las Administraciones Públicas afectadas y personas interesadas, se realizaron numerosas sesiones participativas con el tejido social perteneciente o

vinculado con el ámbito de actuación de los distintos proyectos, para contar con las aportaciones de los diferentes actores implicados en el territorio, ya que ellos son los mejores conocedores de las situaciones existentes y de la problemática histórica del lugar.

A continuación, se detallan alguna de las reuniones y jornadas mantenidas:

FECHA	LÍNEA/S PROYECTO/S (2.1, 2.3..)	TIPOLOGÍA (FV, HUMEDALES, MINAS, RHF, ARN)	DENOMINACIÓN PROYECTO/S	TIPO ACTO (REUNIÓN, JORNADA...)	PÚBLICO OBJETIVO
17/06/2022	2.3	Minas y RHF	Propuesta de actuaciones de restauración de zonas afectadas por la minería en la zona de influencia del Mar Menor	Jornadas participativas	Vecinos de La Unión
18/06/2022	2.3	Minas y RHF	Propuesta de actuaciones de restauración de zonas afectadas por la minería en la zona de influencia del Mar Menor	Jornadas participativas	Vecinos del Llano del Beal
10/11/2022	2.3	Conjunto de todos los proyectos	Conjunto de todos los proyectos	Jornada Técnica. Marco de Actuaciones prioritarias para recuperar el Mar Menor. Universidad Politécnica de Cartagena.	AAVV, Ayuntamientos, investigadores y científicos de la UMU y UPCT, Fundación Sierra Minera, ANSE, Ecologistas en acción, COAG, agricultores y vecinos
21/03/2023	2.3	Minas y RHF	Proyecto Macro de Minas y RHF del Llano del Beal	Jornadas presentación resultados de las analíticas foliares	Vecinos del Llano del Beal
29/04/2024	2.3	Minas	Conjunto1	Reunión informativa sobre el proyecto	Titulares de las fincas afectadas por el proyecto

Tabla 2. Ejemplos de reuniones o jornadas mantenidas con el tejido social de la zona.

Metodología empleada en las jornadas participativas:

- 1) Exposición inicial, síntesis del diagnóstico de la problemática ambiental de la Sierra Minera y su afección al Mar Menor.
- 2) Presentación de la propuesta global de actuaciones de restauración de zonas afectadas por la minería en la zona de influencia del Mar Menor,
- y de las actuaciones propuestas en cada uno de los municipios.
- 3) Trabajo en grupos, en cada una de las jornadas se dividieron los participantes en tres grupos, y en ellos se centraron con más detalle en las actuaciones de cada una de las áreas propuestas en cada municipio.
- 4) Presentación en el plenario del resumen del trabajo de cada grupo.



Figura 3. Exposición de propuestas de actuaciones de restauración de zonas afectadas por la minería en la zona de influencia del Mar Menor.



Figura 4. Jornada sobre propuestas de actuaciones de restauración de zonas afectadas por la minería en la zona de influencia del Mar Menor.



Figura 5. Exposición de las actuaciones a desarrollar de la línea 2.3. del MAPMM.

Las principales aportaciones que realizaron los asistentes y colaboradores a los procesos participativos se detallan a continuación:

- Priorización de unos conjuntos frente a otros: justificado por los problemas de salud pública en la zona y por la preocupación de los vecinos (ejemplo: colegio e instituto de La Unión; entorno del Llano del Beal).
- Interés y colaboración por parte de los Ayuntamientos de Cartagena y La Unión, posibilidad de uso público una vez que los terrenos estén restaurados. Destaca la preocupación de las entidades locales en lo referente al instrumento de ordenación del territorio actualmente en vigor, las Directrices y Plan de Ordenación Territorial del Litoral de la Región de Murcia de 2004, clasifican el suelo como "Suelo afecto por riesgos de la minería". Esta clasificación impone limitaciones al uso público de dichos suelos mientras se mantengan los riesgos.
- Colaboraciones e intercambio de lecciones aprendidas con las universidades locales, en especial con la UPCT, en cuanto a sus experiencias pasadas en fitorremediación y otras actuaciones en los depósitos mineros.
- Colaboración con el IGME desde las etapas iniciales del proyecto, cuestión clave para asegurar que los proyectos cumplen con los requerimientos necesarios para que, una vez finalizadas las obras, los terrenos carezcan de riesgos.
- Coordinación con el organismo de cuenca, la CHS, en las actuaciones a realizar en los márgenes del Dominio Público Hidráulico, y en la evaluación de riesgos de inundabilidad.
- Identificación de posibles afecciones al B.I.C. Sierra Minera y yacimientos arqueológicos, en contacto con Fundación Sierra Minera y con la DG Patrimonio Cultural y Bellas Artes de la CARM, realizando varias visitas de campo.
- Voluntad de colaboración por parte de los titulares de los terrenos, con los que se ha llegado a acuerdos de donación a favor de la AGE para parte de los terrenos incluidos en los proyectos.

Evolución de los proyectos a lo largo del proceso

Los proyectos de restauración ambiental incluidos en la línea 2.3 se redactaron inicialmente como un mismo proyecto o “proyecto macro” que, en formato de proyecto básico, recogía el total de la superficie y una primera definición de las soluciones a adoptar en cada una de las 9 zonas en las que se dividió la actuación sobre los depósitos de la Sierra Minera.

Durante el proceso de redacción de este, e incluso con posterioridad, durante la redacción de los proyectos de ejecución, se ha venido incorporando aquellas modificaciones surgidas tras el proceso de información pública, la consulta a organizaciones y agrupaciones, y las distintas jornadas participativas e informativas celebradas con los vecinos de las localizaciones de el Llano del Beal y La Unión.

Estas modificaciones han comprendido, en esencia, mejoras en la funcionalidad, sostenibilidad y adaptabilidad a las necesidades existentes. Ejemplo de ellas es que se han incrementado en algunos casos las

superficies de actuación para una mayor integración con el entorno, como en el caso del proyecto del Llano del Beal en el que se ha variado la selección de especies a implantar, garantizando así un mejor ajuste a las condiciones del entorno y los objetivos del diseño paisajístico, como en los proyectos de Brunita y Descargador.

Igualmente, y tras las conversaciones mantenidas con vecinos y agrupaciones se han realizado modificaciones para un mejor uso de los espacios restaurados, incluyendo estudios de integración entre los propios proyectos a fin de dotarlos de continuidad paisajística y poner en valor en entorno periurbano.

En resumen, las modificaciones incorporadas a lo largo del proceso han permitido que los proyectos de restauración ambiental no solo respondan mejor a los objetivos del Marco de Actuaciones Prioritarias para la recuperación del Mar Menor y las necesidades ecológicas del entorno, sino también a las expectativas y demandas de las comunidades locales. Estos cambios han fortalecido la funcionalidad y sostenibilidad de las soluciones adoptadas, asegurando un resultado más eficiente y ajustado a las realidades del territorio.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



Marco de Actuaciones
Prioritarias para Recuperar
el **Mar Menor**