



Minería sostenible en zonas altamente erosivas con paisajes ecológicamente sensibles

Recomendaciones técnicas basadas en investigaciones desarrolladas en explotaciones de caolín del entorno del Parque Natural del Alto Tajo

Beca Torres Quevedo'17 de Ignacio Zapico Alonso desarrollada en DDM S.L.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



Título original: Minería sostenible en zonas altamente erosivas y con paisajes ecológicamente sensibles. Recomendaciones técnicas basadas en investigaciones desarrolladas en explotaciones de caolín del entorno del Parque Natural del Alto Tajo

Autores: Ignacio Zapico Alonso, José F. Martín Duque, Lázaro Sánchez Castillo, Jonathan Laronne, Alfonsa Campos Saucedo

Edición: Restauración Geomorfológica

ISBN: 978-84-09-44589-9

Registro de propiedad intelectual (nº asiento registral): 16/2022/8070

Primera edición: septiembre 2022

Ciudad/País: Madrid/España

Nota: los derechos de esta obra están protegidos y cualquier uso o reproducción de su contenido con fines comerciales queda supeditado a un acuerdo con su autor principal. Se autoriza a su distribución y uso no comercial citando convenientemente la obra tal y como se señala en el siguiente apartado.

Forma de citar este trabajo: Zapico Alonso I, Martín Duque JF, Sánchez Castillo L, Laronne J, Campos Saucedo A. 2022. Minería sostenible en zonas altamente erosivas y con paisajes ecológicamente sensibles. Recomendaciones técnicas basadas en investigaciones desarrolladas en explotaciones de caolín del entorno del Parque Natural del Alto Tajo. Madrid, España: Restauración Geomorfológica. ISBN: 978-84-09-44589-9

Autores:

Ignacio Zapico Alonso. Profesor Ayudante Doctor. Facultad Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. Instituto de Geociencias (CSIC-UCM).

José F. Martín Duque. Profesor Titular. Facultad Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. Instituto de Geociencias (CSIC-UCM).

Lázaro Sánchez Castillo. Ingeniero Técnico Minas. Dpto. Ingeniería Geológica y Minera. Universidad Politécnica de Madrid.

Jonathan Laronne. Catedrático emérito, Universidad de Ben-Gurión (Israel).

Alfonsa Campos Saucedo. Directora Gerente. Diseño y Desarrollo Minero S.L.

Documento elaborado bajo el auspicio de:



Entidades colaboradoras:



Índice

Presentación	3
1. Introducción.....	7
1.1. Problema ambiental en zonas mineras altamente erosivas	7
1.1.1. Contexto global.....	7
1.1.2. Problemas de los métodos actuales de cuantificación de contaminación fluvial por exceso de sedimentos	10
1.1.3. Restauraciones mineras sin red de drenaje.....	12
1.2. Resumen de las mejores soluciones disponibles para hacer compatible la actividad minera con la protección del medioambiente.....	18
2. Fase de investigación y diseño de la explotación.....	21
2.1. Parámetros que necesitan definir niveles de referencia en relación a la producción de sedimentos y cómo medirlos	22
2.2. Cómo proceder en los casos en que una explotación ya esté funcionando	26
3. Fase activa de una explotación minera.....	29
3.1. Diseño, construcción y mantenimiento de balsas de decantación	29
3.2. Monitorización mediante estaciones hidrológicas y sedimentarias automáticas	33
3.3. Definición de alertas de posibles desequilibrios o contaminación a escala de evento y anual.....	37
3.3.1. Escala de evento	37
3.3.3. Procedimiento de detección de contaminación por exceso de emisión de sedimentos a la red fluvial en zonas mineras	39
4. Fase de cierre y restauración.....	41
4.1. Restauración en terrazas	42
4.2. Restauración con base geomorfológica.....	47
4.2.1. Fundamentos teóricos	47
4.2.2. Aspectos importantes a tener en cuenta para mejorar su implantación y ejecución	51
4.3. Monitorización de una restauración.....	56
5. Conclusiones	67
6. Bibliografía	71

Presentación

El presente documento constituye un material docente, tanto de educación superior como de formación continua, que describe el marco teórico y el desarrollo técnico y práctico de las mejores técnicas disponibles para compatibilizar la extracción de recursos minerales con la conservación del medioambiente, desde el punto de vista del control de la erosión y la estabilización del terreno. La ausencia de un buen plan de gestión con medidas eficaces frente a estos problemas puede ocasionar que el paisaje minero deteriore ecosistemas acuáticos por exceso de emisión de sedimentos, o impedir el establecimiento de un nuevo ecosistema en terrenos restaurados.

Las medidas y procedimientos descritos abarcan todo el ciclo de vida de una explotación minera y son el resultado de más de 10 años de investigaciones. Sobre todo, se basan en los trabajos de I+D+i asociados a la ayuda posdoctoral Torres Quevedo (ref. PTQ-17-09404), otorgada por la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación y Universidades en 2018 (convocatoria de 2017) a Ignacio Zapico Alonso y desarrollada en la ingeniería Diseño y Desarrollo Minero S.L. (DDM) durante casi dos años y medio. En total se han publicado cinco artículos científicos (4 Q1, 1 Q2) y se ha desarrollado una patente ya concedida por la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM).

Durante este periodo la empresa (DDM) ha trabajado con la Universidad Complutense de Madrid, el Instituto de Geociencias (CSIC-UCM) y la Universidad de Ben-Gurión del Néguev de Israel para mejorar sus productos y servicios de gestión ambiental en base a las mejores técnicas disponibles. Todos los proyectos se han desarrollado y testado en varias explotaciones mineras de clientes de la consultora DDM, siendo las de la empresa CAOBAR S.A. en las que más se han implementado y desarrollado, por su elevada complejidad. Su caso es de especial importancia, ya que la explotación de sus minas se realiza en las inmediaciones de un espacio protegido, el Parque Natural del

Alto Tajo, y su viabilidad está muy condicionada a la adopción de las mejores prácticas para el control de la erosión y protección del medioambiente.

Como resultado se han obtenido varias publicaciones científicas en revistas destacadas del panorama internacional y sometidas a proceso de revisión por pares, tales como *Journal of Cleaner Production*, *Engineering Geology* o *Catena*, las cuales avalan el trabajo realizado. Los autores han pretendido hacer aquí una síntesis de estos artículos y que el documento sirva como un recurso docente, para formar tanto a profesionales de la industria minera y técnicos de las administraciones públicas con competencias en la materia, como a estudiantes universitarios.

La utilidad e importancia del tema tratado estriba no solo en sus aspectos técnicos sino también en su trascendencia económica. El acusado ahorro en las labores recurrentes de mantenimiento de las infraestructuras (tales como escombreras o balsas), compatible con unos asumibles costes de diseño y puesta en obra sobre la base de una correcta planificación minera, constituye uno de los principales alicientes para aplicar las técnicas descritas. Desde el punto de vista medioambiental, la introducción de dichas metodologías muestra efectos autosostenibles y perdurables en el tiempo, en contraposición con algunos de los resultados obtenidos al aplicar otras técnicas tradicionales de restauración minera y control ambiental de efluentes de las explotaciones. Esto ha originado que distintas administraciones competentes en materia minera, como la Consejería de Desarrollo Sostenible de Castilla-La Mancha, consideren su aplicación como un factor reductor de las garantías económicas para responder de la restauración de los espacios naturales afectados, lo que se traduce en un elemento a considerar en la evaluación económica y financiera de los proyectos mineros.

Los casos y medidas aquí descritos también han formado parte de candidaturas premiadas. Las distinciones obtenidas han sido: i) *II Premio de Minería y Metalurgia Sostenible*, otorgado por la Confederación Nacional de Empresas de Minería y

Metalurgia (CONFEDEM) en 2015; ii) *Segundo puesto del II Premio de Transferencia de Tecnología y de Conocimiento* otorgado, por la Universidad Complutense de Madrid en 2016; iii) *Segundo puesto del VIII Concurso de Divulgación Científica, modalidad de vídeo divulgativo*, otorgado por la Universidad Complutense de Madrid en 2019; iv) *Premio Potencia de Maquinaria de OP e Ingeniería Civil 2020. Categoría: mejor Acción Minera*, otorgado por la revista Potencia (grupo TPI) en 2020.

Estructura del documento

La introducción (**sección 1**) describe los principales aspectos teóricos que caracterizan el problema ambiental y por tanto van a condicionar la toma de decisiones sobre qué medidas de protección se tienen que llevar a cabo. Muchas de las dificultades que existen a la hora de abordar el tema de la erosión en zonas mineras surgen por una incorrecta interpretación de la problemática y sus condicionantes. Las siguientes secciones del documento están encaminadas a describir las mejores técnicas y procedimientos disponibles de protección ambiental frente a la erosión en todas las fases del ciclo de vida de una explotación minera: investigación y diseño (**sección 2**), explotación (**sección 3**) y restauración (**sección 4**).

Recursos online complementarios

Webs

<https://es.linkedin.com/in/ignacio-zapico-alonso>

<https://www.ucm.es/ignaciozapicoalonso/>

www.restauraciongeomorfologica.es

Vídeos demostrativos

- Ejemplo de restauración con base geomorfológica en la mina Machorro:
<https://www.youtube.com/watch?v=Set5shHFYS8&t=26s>
- Ejemplo del uso de la restauración con base geomorfológica en la estabilización de un deslizamiento rotacional en una restauración en terrazas en la mina Nuria:
<https://www.youtube.com/watch?v=rYDQoGGd4l0&t=450s>
- Monitorización topográfica en la mina restaurada con base geomorfológica de Somolinos: <https://www.youtube.com/watch?v=cLXiXzVvoXc&t=64s>
- Transporte de sedimentos en un paisaje natural altamente erosionable, cárcava de Poveda: <https://www.youtube.com/watch?v=zWydvtll548>
- Minería en alta resolución. Trabajos de seguimiento topográfico y control de producciones y estabilidad geotécnica en las minas de caolín del Alto Tajo:
<https://www.youtube.com/watch?v=v0wlJDqV1vY>

1. Introducción

1.1. Problema ambiental en zonas mineras altamente erosivas

1.1.1. Contexto global

Una explotación minera ocasiona un gran cambio en la fisiografía y paisaje de un territorio. Si los recursos excavados coinciden con materiales vulnerables a la erosión hídrica, su exposición en superficie supone un problema que debe abordarse de modo prioritario (**Fig. 1**). Si a este condicionante se le une un clima 'erosivo', caracterizado por precipitaciones de alta intensidad, se pueden generar escorrentías capaces de arrastrar gran cantidad de sedimento hacia los cursos fluviales situados aguas abajo, alterando sus condiciones físicas naturales. Y todo ello si nos referimos a contextos en los que no existe posibilidad de contaminación química, como es el caso que nos ocupa. En esos casos el problema es más complejo. Para evitar que esto suceda, las explotaciones están obligadas a adoptar medidas, tanto preventivas de control de la erosión, como correctoras ejecutando un completo plan restauración, tal y como se establece en la legislación aplicable (Real Decreto de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras, Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental y demás normativa de desarrollo de ámbito nacional y autonómico).

Por otra parte, hemos de tener en cuenta que los cursos fluviales llevan siempre asociado un transporte de sedimento, es decir, es una propiedad natural de los mismos que varía ampliamente a lo largo del año, según las estaciones y los diferentes regímenes de los ríos (crecida o caudal base). Por tanto, en zonas mineras donde hay condiciones propensas para la erosión (coincidencia de precipitaciones intensas con pendientes elevadas y materiales fácilmente erosionables), el principal problema ambiental no es si hay o no sedimento en un río, sino si a los ríos está llegando más

sedimento del que producen las cuencas vertientes no afectadas por minería, de tal forma que alteren su equilibrio natural (Chalov, 2014; Pietroñ et al., 2017; Zapico et al., 2017) y el de sus ecosistemas (**Fig. 2**).



Figura 1. Vista de la mina Machorro situada en parte de una ladera de la cuenca del arroyo Merdero, afluente del río Tajo, en la que se puede apreciar un evidente cambio de uso del suelo en comparación con las laderas arboladas de alrededor. La actividad minera ocasiona la exposición de materiales fácilmente erosionables, cuya movilización está controlada, en este caso, mediante balsas de sedimentación (c). Una vez que el agua y el sedimento son gestionados por el sistema de balsas, el agua con bajos contenidos de sedimento se vierte a la red fluvial natural. Imagen extraída de (Zapico et al., 2018)). El resto de las letras de la imagen corresponden a otras partes de la explotación: (a) hueco minero; (b) escombreras temporales sin restaurar; (R1) restauración en terrazas cubierta con coluvión; (R2) restauración en terrazas con taludes de pendientes suaves y cubiertos con coluvión; (R3) restauración en terrazas cubierta con coluvión y suelo; (R4) restauración geomorfológica; (ER) escombrera experimental con diferentes tratamientos de restauración.

En la **Fig. 3** se puede ver una comparación entre tasas de erosión que ilustra bien todo lo expuesto anteriormente, referida al contexto de la zona minera del Alto Tajo. Los paisajes no afectados por actividades extractivas producen sedimentos, y algunos, como las cárcavas naturales, pueden alcanzar valores muy elevados, tal y como ocurre en la cárcava de Ribagorda (Martín-Moreno et al., 2014). Las explotaciones sin medidas

adecuadas de control de la erosión y restauración generan tasas de sedimento elevadas, con potencial para deteriorar ecosistemas fluviales, como ocurría con la mina abandonada de Santa Engracia (Martín-Moreno et al., 2018). En cambio, medidas de control de la erosión y la sedimentación, tales como balsas de sedimentación con mantenimiento, pueden retener la mayoría de ese sedimento, tal y como ocurre en la mina activa El Machorro (Martín-Moreno, 2013), y verter solo escorrentías con concentraciones bajas de sedimento. Este sistema de balsas también está implementado en la mina María José, cuyas escorrentías, tras pasar por el sistema de balsas, producen tasas de emisión bajas (Zapico et al., 2021b) similares a las que producen zonas restauradas exitosamente, como las llevadas a cabo en la mina El Machorro (Zapico et al., 2018).



Figura 2. Efecto del incremento de sedimento en cursos fluviales naturales debido a escorrentías mineras. En ellas se puede ver la desembocadura de dos afluentes del Tajo, el Tajuelo y el Merdero, en el propio río Tajo en la zona minera del Alto Tajo. Ambos afluentes cuentan en sus cuencas con minas abandonadas y no controladas, ajenas a CAO BAR S.A, que incrementan el contenido de sedimento. Foto tomada de (Zapico Alonso, 2017)).

En un contexto internacional, las cifras de la **Fig. 3** se pueden comparar con las tasas tolerables de producción de sedimentos establecidos en un país con una gran tradición minera y medioambiental como es Estados Unidos: 4.5 y 11.2 t ha⁻¹ año⁻¹ (Howard y Loch 2019).

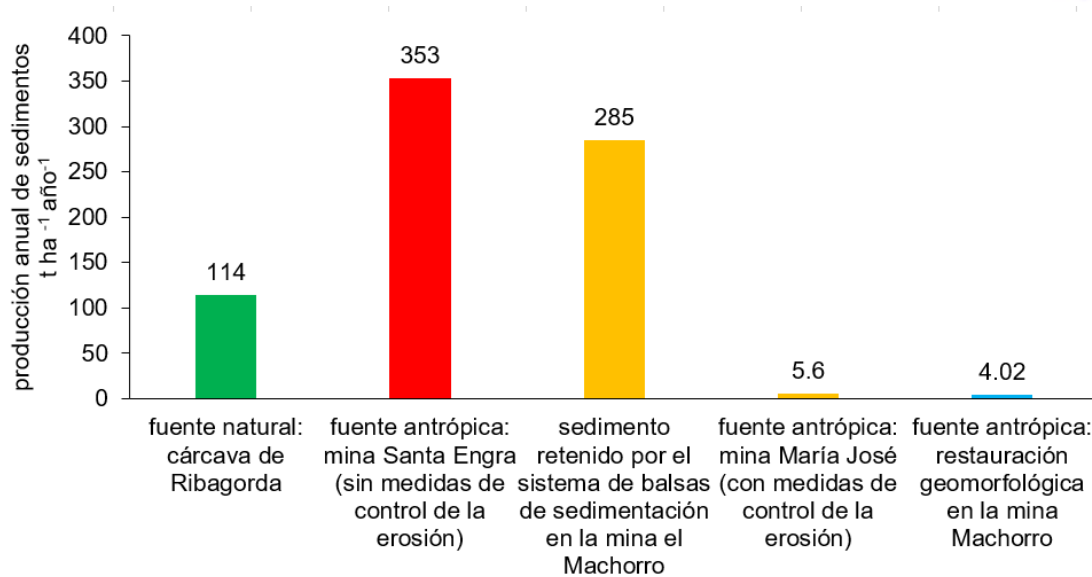


Figura 3. Comparación de tasas de erosión en la zona minera del Parque Natural del Alto Tajo. Reelaborado de (Zapico et al., 2021b).

1.1.2. Problemas de los métodos actuales de cuantificación de contaminación fluvial por exceso de sedimentos

Actualmente las principales legislaciones mundiales que regulan este problema ambiental usan la variable de Concentración de Sólidos en Suspensión (CSS) para medir si hay impacto sobre la dinámica de sedimentos de un curso fluvial. Como referencia para hacer la valoración, es decir, la 'línea base' (*baseline*), se emplean datos de ese parámetro obtenidos de un paisaje natural y, en el caso de la mayoría de legislaciones, solo se usan unos pocos valores puntuales y genéricos (Bilotta y Brazier, 2008; Zapico et al., 2017). Estas reglamentaciones normalmente instan también a que la evaluación de si hay contaminación o no en relación a la CSS se haga mediante la comparación directa del valor de referencia, con los resultados obtenidos de muestras puntuales tomadas en la desembocadura de una zona minera. Sin embargo, no se tienen en cuenta otros muchos aspectos, situación que puede acarrear la no identificación de eventos de contaminación, o hacerlo falsamente (Bilotta y Brazier 2008). Son ya varias las publicaciones científicas que ponen de manifiesto la limitación

de este marco de evaluación de contaminación sobre la dinámica de sedimentos natural de un curso fluvial. En concreto son tres los principales fallos que se cometen:

- a) Una explotación minera no es una cuenca con un curso fluvial permanente, sino que suele ocupar parte de las laderas de su cuenca vertiente ocasionando emisiones efímeras, al igual que hacen el resto de las laderas de su entorno donde existen otros usos del suelo como arbolado, agricultura o cárcavas naturales. Es decir, dado que la minería es un uso del suelo desarrollado a escala de ladera, debería de compararse su tasa de producción de sedimentos ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$) con las tasas que producía la misma ladera con los usos del suelo previos a la actividad o, en su defecto, con las laderas que desarrollan otros usos del suelo predominantes en la zona alrededor suyo (Howard y Loch 2019). En este contexto no tiene mucho sentido comparar directamente valores de CSS como si ambos elementos (curso fluvial natural que recibe aguas de la zona minera, y la propia explotación) fueran dos masas de agua similares. Por ejemplo, si se hicieran comparaciones directas de valores de CSS entre un curso fluvial natural y el uso del suelo “cárcavas naturales”, en la mayoría de los casos las cárcavas siempre van a tener valores muy superiores (Zapico et al., 2017). Esto podría llevar a su catalogación como “contaminación”, cuando en realidad son procesos naturales. Es decir, solo se puede hablar de contaminación si desde la explotación minera hay un incremento evidente sobre la tasa de sedimentos medida localmente en las laderas no mineras del entorno.
- b) De todas maneras, como se detallará más adelante, aún con la aplicación de la mejor medida de control de la erosión y la producción de sedimentos, las balsas de sedimentación, se pueden generar incrementos puntuales no naturales en la CSS de un río y, por tanto, conviene estudiarlo a una escala de evento (minutos u horas). Si ese incremento es de gran magnitud y prolongado en el tiempo, sí

podría generar alguna alteración en el curso fluvial que recibe las aguas de la mina (Bilotta y Brazier 2008).

Para poder calcular correctamente este posible incremento en los valores de CSS, lo primero que hay que entender es que no se puede usar un único valor de CSS como línea base (*baseline*) para representar la complejidad natural de la dinámica de sedimentos de un curso fluvial. Este valor varía ampliamente de forma natural a lo largo del año y según los regímenes de un río (crecida o caudal base). Y también depende de la ubicación del curso fluvial y del tramo estudiado. Este marco implica que es necesario definir líneas base de referencia tomando en un gran número de muestras, para que esta complejidad quede representada (Grove et al., 2015; Zapico et al., 2017).

- c) Por otro lado, no se pueden comparar directamente los valores de CSS de ambos elementos, curso fluvial y explotación minera, porque normalmente sus caudales suelen ser muy diferentes, siendo bastante mayor el del primero en la mayoría de los casos. En estas situaciones, aunque la CSS pueda ser mayor en las escorrentías de la explotación que en el cauce natural que las recibe, esta puede quedar totalmente diluida en el curso fluvial, debido a la diferencia de caudales (Howard y Loch 2019). Por eso es necesario incorporar también el caudal al marco de evaluación, y no hacer meras comparaciones puntuales de la CSS.

1.1.3. Restauraciones mineras sin red de drenaje

Desde un punto de vista geomorfológico y edáfico, el impacto de la actividad minera y de cualquier actividad de movimiento de tierras, no sólo supone un drástico cambio de usos de suelo (**Fig. 1**), sino también la eliminación de la red de drenaje que cualquier

paisaje posee de forma natural. La mayoría de la superficie terrestre se ha modelado (y modela) por procesos fluviales y, por tanto, se organiza en cuencas con redes de drenaje, bien canales permanentes (ríos), bien efímeros (arroyos o vaguadas). A veces no se es consciente de este hecho porque se tiende a pensar que los cursos fluviales son sólo aquellos que llevan agua todo el año, como puede ser el río Tajo, o muchos de sus tributarios. Sin embargo, estos se alimentan de escorrentías provenientes de sistemas de canales secundarios, que solo llevan agua durante eventos de precipitación, y que por tanto pueden pasar “desapercibidos” en ausencia de episodios de lluvia. Un ejemplo de este impacto se puede ver en la mina abandonada Nuria del Alto Tajo (**Tabla 1** y **Fig. 4**). Allí, la actividad minera es responsable de una reducción del 31% en la densidad de drenaje original. En 1984 la densidad de drenaje tenía una forma dendrítica típica de un paisaje modelado por procesos hidrológicos. Posteriormente, la actividad minera la eliminó casi en su totalidad e introdujo líneas de drenaje en forma de cunetas rectilíneas en los extremos de la explotación. Ya en el cese de actividad, en 2010, comenzaron a desarrollarse regueros y cárcavas por toda la explotación. Este es un fenómeno típico de las zonas mineras, donde los procesos hidrológicos comienzan a erosionar los paisajes en busca de una nueva red de drenaje que confiera estabilidad al paisaje (Zapico et al., 2021c).

Tabla 1: Evolución temporal de la densidad de drenaje en la mina Nuria (longitud y densidad de los canales). Modificado de (Zapico et al., 2021c).

	1984			2010			2018		
	longitud		densidad m ha ⁻¹	longitud		densidad m ha ⁻¹	longitud		densidad m ha ⁻¹
	m	%		m	%		m	%	
red de drenaje original	5,360	100	67	756	17	10	735	13	9
cunetas	0	0	0	2,910	64	36	2,950	53	37
red de drenaje restaurada ¹	0	0	0	0	0	0	973	18	12
cárcavas ²	0	0	0	872	19	11	905	16	11
total	5,360	100	67	4,540	100	57	5,560	100	69

¹ densidad de drenaje creada con prácticas de restauración con base geomorfológica

² en estériles mineros sin y con restauración

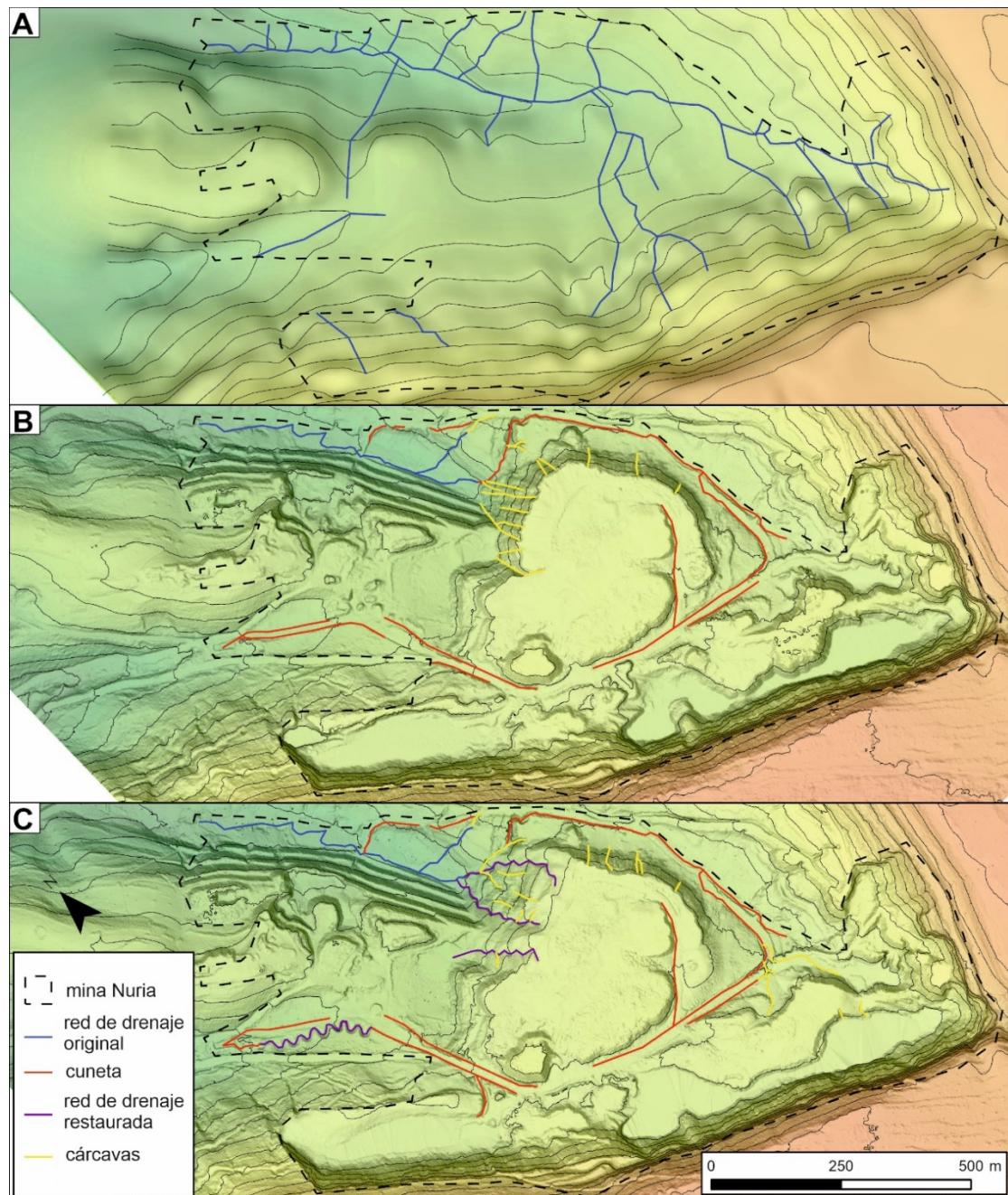


Figura 4. Evolución temporal de la red de drenaje en la mina abandonada Nuria: (A) 1984, antes de la actividad minera; (B) 2010, cese de la actividad; (C) 2018, tras 8 años de acción de procesos hidrológicos naturales y prácticas de restauración encaminadas a aumentar la densidad de drenaje y estabilización. Reelaborado de (Zapico et al., 2021c).

En esta misma explotación se observó que la reducción de la densidad de drenaje es mayor, 58%, si se tiene en cuenta que el movimiento de tierras ha generado un cambio en la tipología de los materiales superficiales, tanto en composición como en compactación. Es decir, la actividad extractiva no solo cambia las formas del paisaje,

sino que también transforma la naturaleza de los materiales expuestos. Los nuevos materiales superficiales van a carecer de la estructura y compactación natural original, hecho que los harán más susceptibles a la erosión y por tanto solo van a poder gestionar las escorrentías superficiales con una densidad de drenaje mayor respecto a la original. En este contexto la densidad de drenaje que deberían tener estos terrenos alterados se tiene que evaluar con respecto a una superficie estable cuyos materiales fueran similares a los de la superficie explotada y que se encontrase en la zona.

El resultado final de este impacto sobre la red de drenaje es que la superficie permanece inestable con procesos de erosión activos, lo que no solo impide el establecimiento de un nuevo ecosistema, sino que puede generar riesgos de destrucción de infraestructuras sensibles y, lo que es más importante en términos hidrológicos, incrementa las tasas de producción de sedimentos emitidos a la red fluvial situada aguas abajo. Las **Fig. 5 y 6** ilustran muy bien esta situación con el avance de un proceso erosivo en la mina Nuria.

Aquí, el progreso de una cárcava ha seccionado totalmente una pista minera y se dirige hacia un dique de arenas que cierra una balsa minera, con miles de metros cúbicos de agua y sedimento. En caso de ser capturada, este proceso ocasionaría un vertido de grandes dimensiones. Esta cárcava avanza anualmente entre 1.3 y 26.5 metros, dependiendo del grado de precipitación anual y su intensidad. Su profundidad oscila entre 0.8 y 3.3 metros. Para solucionar estos problemas, desde 2014 se vienen realizando actividades de restauración con el objetivo de aumentar la densidad de drenaje e introducir formas más estables mediante la aplicación de restauraciones con base geomorfológica (Zapico et al., 2021c, 2020). Sin embargo, como se ve en los datos de 2018, la erosión en cárcavas también sigue avanzando en aquellas zonas aún no estabilizadas adecuadamente.



Figura 5. Erosión remontante de una cárcava que ha cortado una pista en la mina Nuria. (A) Detalle del “escalón” o *knickpoint* (b) que define el avance hacia aguas arriba (enero 2016); (B) vista de cómo la erosión ha terminado cortando la pista (febrero 2017); (a) poste de madera usado como referencia. Figura extraída de (Zapico et al., 2021c).

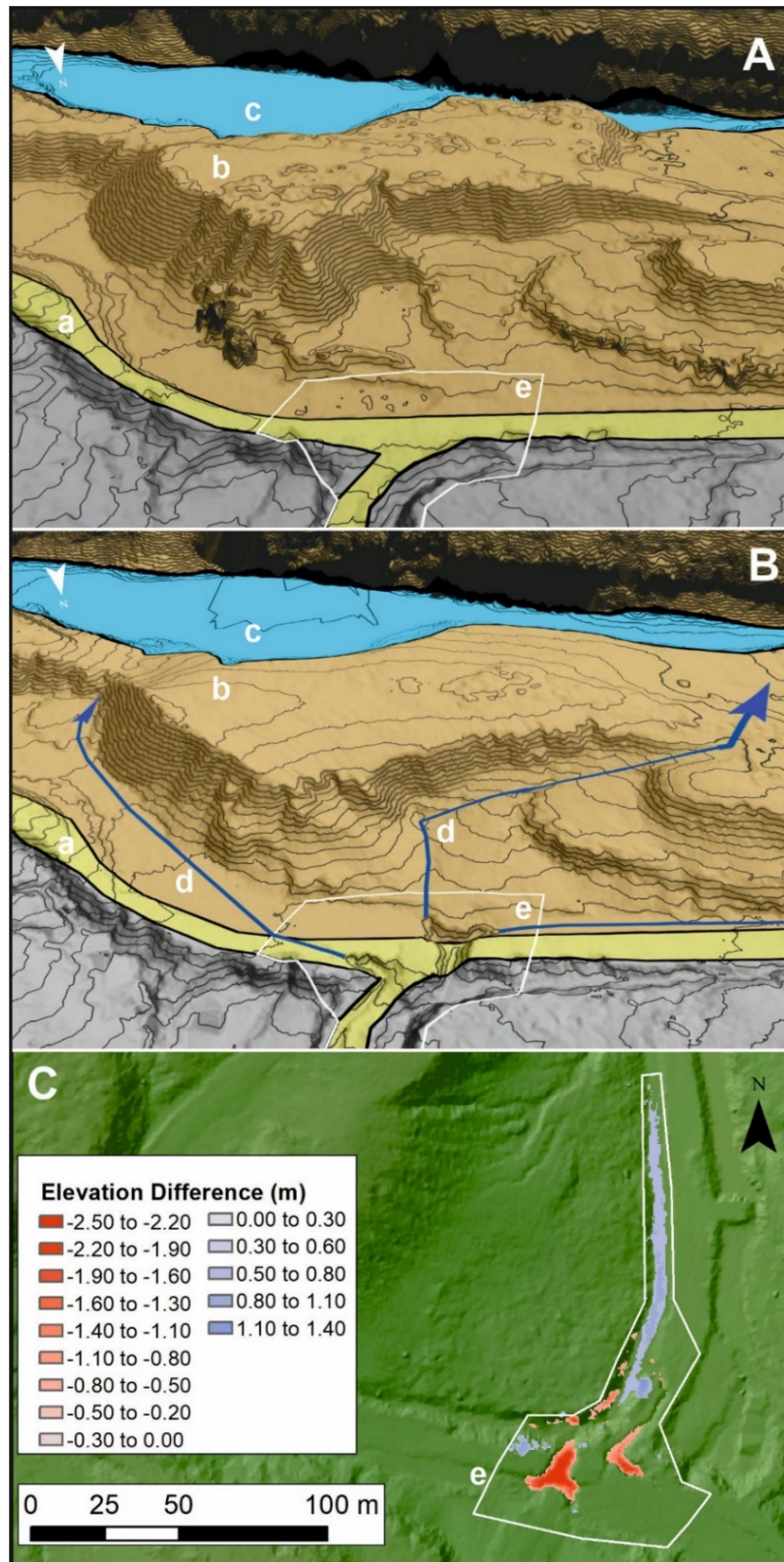


Figure 6. Topografía antes (A, 2010) y después (B, 2018) del desarrollo de la cárcava de la Figura 5 y (C) mapa del material erosionado y depositado en ese intervalo (C). (a) Pista minera; (b) dique artificial de arenas que encierra una balsa; (c) balsa minera; (d) evolución probable de la cárcava; (e) polígono usado para hacer la comparación volumétrica entre ambas fechas. Figura extraída de (Zapico et al., 2021c).

1.2. Resumen de las mejores soluciones disponibles para hacer compatible la actividad minera con la protección del medioambiente

Partiendo del marco conceptual descrito anteriormente, en el resto del documento se describe toda una batería de medidas y procedimientos para controlar de forma temporal (fase activa de la mina) y permanente (fase cierre-restauración) las emisiones de sedimento desde explotaciones mineras (**Fig. 7**).

De forma resumida se puede decir que, durante la fase de investigación y diseño preliminar, hay que estudiar las tasas de producción de sedimentos naturales de las laderas donde se ubicaría la explotación y los valores de CSS que lleva el curso fluvial natural que va a recibir sus escorrentías.

Durante la fase de explotación hay que controlar la erosión y la sedimentación sobre la base del manejo de la escorrentía superficial y los sedimentos arrastrados mediante la construcción de balsas de sedimentación, que deberán ser mantenidas continuamente. También sus vertidos finales se deberían monitorizar con estaciones hidrológicas y sedimentarias automáticas de alta resolución temporal. Los valores obtenidos en dichas mediciones se evaluarán usando como referencia los equivalentes naturales, medidos en la fase de investigación y diseño preliminar.

Finalmente, una vez que la explotación ha cesado su actividad, se tiene que llevar a cabo una fase de cierre, con prácticas de restauración con base geomorfológica encaminadas a generar paisajes “autosostenibles”, es decir, que no requieran mantenimiento. El elemento vertebrador de la restauración debería ser la introducción de una red de drenaje tridimensional adecuada, con canales de perfiles longitudinales cóncavos. Esta red se tiene que completar con geoformas estables en sus vertientes, con perfiles convexo-cóncavos, reposición de suelos y prácticas adecuadas de revegetación. En caso de no poder optar por estas metodologías geomorfológicas y tener que usar modelos de restauración en terrazas, estas deberían incorporar una serie

de medidas encaminadas a mejorar su desempeño hidrológico y sedimentario en el largo plazo.



Figura 7. Esquema resumen de las mejores técnicas y medidas disponibles para gestionar el problema de la erosión hídrica e inestabilidad del terreno en una explotación minera, en base a las investigaciones llevadas a cabo en la zona minera de caolín del Alto Tajo.

2. Fase de investigación y diseño de la explotación

Antes de proceder a la apertura de una explotación, es necesario acometer una fase inicial de investigación para evaluar si la cantidad de reservas del recurso a extraer es suficiente como para justificar técnica y económicamente la viabilidad del proyecto. Para ello se hacen una serie de reconocimientos del terreno, aplicando técnicas geofísicas, geoquímicas y de caracterización tecnológica, entre otras, que culminan con la ejecución de una optimizada serie de sondeos con recuperación de testigo, localizados en zonas concretas. Por lo general tienen escasa extensión, y ocasionan un impacto mínimo y fácil de controlar. Una vez terminada esta fase, las empresas están obligadas a restaurar las posibles afecciones generadas, independientemente de si el proyecto se lleva a cabo o no.

A esta fase de investigación le sucede la etapa de diseño de la explotación. Consiste en la elección del método de explotación y la definición de la geometría preliminar del hueco operativo a desarrollar para que encaje con las condiciones de contorno existentes. Esto último se hace aplicando un determinado algoritmo de optimización y teniendo en cuenta la delimitación territorial de los servicios auxiliares, entre otros factores. Seguidamente se estiman las reservas a beneficiar y los estériles a generar por el proyecto minero y se finaliza, tras comprobarse la viabilidad económica de la extracción del mineral, con la definición del plan de labores extractivas.

Desde un punto ambiental, la fase de investigación y diseño es la ideal para fijar los niveles de referencia naturales, es decir, la 'línea base' (*baseline*), de aquellos parámetros que se puedan ver afectados en el desarrollo de una actividad extractiva en relación con la problemática de la erosión, como pueden ser la producción de sedimentos de una ladera y la CSS de un curso fluvial, ya sea efímero o permanente.

Estos valores servirán para valorar de una forma precisa la posterior afectación al medio ambiente cuando la explotación esté en funcionamiento.

Las ventajas de medir los valores de referencia en la fase de investigación y diseño son dos. Por una parte, el paisaje aún no ha sido modificado por la actividad extractiva y, por tanto, los valores que se miden van a reflejar fielmente el funcionamiento preoperacional de los procesos hidrológicos y erosivos. Por otro lado, dado que la empresa tiene que dedicar recursos humanos y técnicos para hacer la valoración del recurso a explotar, ya contará en campo con personal y medios para fijar los niveles de referencia, reduciendo así los costes; se trata de aprovechar sinergias de ambos trabajos.

2.1. Parámetros que necesitan definir niveles de referencia en relación a la producción de sedimentos y cómo medirlos

Una correcta evaluación del impacto de la actividad extractiva sobre las dinámicas hidrológicas y sedimentarias requiere comprender el problema a dos escalas temporales distintas. Una explotación normalmente está localizada en parte de las laderas que componen una cuenca hidrográfica, así que para poder decir si el uso del suelo “actividad minera” está generando un problema de contaminación a la red fluvial por exceso de sedimento, hay que comparar su producción de sedimentos anuales, con la que tendrían los usos del suelo que hubiera en la misma superficie anteriormente al movimiento de tierras. Por otra parte, los caudales instantáneos que produce una mina pueden afectar momentáneamente a la dinámica natural de la CSS de un curso fluvial que recibe las aguas de una zona explotada, y por ello conviene estudiarlos a escala de minutos u horas, por si se llega a producir una “alteración puntual” en el curso fluvial natural que las recibe. Todo ello teniendo como referencia la gran variabilidad natural que presenta la CSS en cualquier cauce natural.

Por lo tanto, para poder cubrir los dos tipos de impactos, a escala anual y de evento (minutos/horas), necesitamos definir dos niveles de referencia basados en un amplio número de muestras tomadas en campo: i) tasa de emisión anual de sedimentos en $t\ ha^{-1}a\tilde{no}^{-1}$ de laderas naturales; ii) valores instantáneos de CSS ($g\ l^{-1}$) y caudal ($m^3\ s^{-1}$) del curso fluvial natural que va a recibir las aguas de la explotación.

El primer parámetro se medirá en el punto más aguas abajo de la futura explotación, en el lugar en el que las escorrentías de la zona explotada van a ser liberadas al terreno natural. Dado que el principal objetivo es conocer el total de sedimentos producidos por hectárea anualmente, se realizará con elementos totalizadores, tales como diques (Bugosh and Epp, 2019), balsas (Zapico et al., 2018) o *sediment fences* (Martín-Moreno et al., 2016). Estos sistemas permitirán retener y cuantificar el sedimento de una forma muy económica. En la sección **4.4. Monitorización de una restauración** aparece más información sobre la monitorización con elementos totalizadores, ya que estas estructuras también se podrán usar para monitorizar y controlar el sedimento producido por erosión en restauraciones.

Los resultados obtenidos con las anteriores estructuras suelen ser bastante precisos, sin embargo, según como se instalen, es probable que parte del sedimento que viaja en suspensión no sea retenido. Por eso, si se quiere hacer una monitorización más precisa habrá que instalar también una estación hidrológica y sedimentaria automática de alta resolución temporal que permita registrar datos instantáneos de la totalidad de sólidos en suspensión. Dichas estaciones incrementan el coste de la monitorización, pero, una vez definido el nivel de referencia, este equipamiento podrá ser usado para otros cometidos de la futura explotación: monitorizar los vertidos de la explotación mientras está activa y detectar posibles episodios de contaminación (Zapico et al., 2021b) y/o monitorizar la superficie una vez restaurada para demostrar su grado de estabilidad (Zapico et al., 2018). Para más información sobre la monitorización con estaciones

hidrológicas, consultar el apartado **3.2. Monitorización mediante estaciones automáticas hidrológicas y sedimentarias.**

Estas estaciones con sensores también se deberían emplear para medir los niveles de referencia relativos a la CSS y al caudal del curso fluvial que recibirá las escorrentías de la zona afectada por movimiento de tierras. Estos dos parámetros también se podrán medir mediante un procedimiento más barato basado en la recogida de muestras de agua tomadas de forma manual y con muestreadores automáticos no electrónicos (**Fig. 8**). Este muestreador consiste en una estructura fija, situada por encima del nivel de caudal normal que presenta un curso fluvial en ausencia de crecidas, en la que se colocan botes a diferentes alturas que al producirse una crecida se llenan. Los botes tienen un sistema de sifones que facilita la entrada de agua. Estos muestreadores serán vaciados cada vez que haya un evento de crecida en el canal del curso fluvial, de modo que estén listos en el siguiente evento. Las muestras manuales se tomarán a mano o con una estructura que permita introducir un bote en el curso fluvial a estudiar, y deberán tener al menos periodicidad semanal. El caudal se medirá mediante medidas continuas de altura de lámina de agua, y su transformación a caudal se hará con ecuaciones hidrológicas, o con una serie de valores de velocidad medidos en la zona de muestreo (Zapico Alonso, 2017; Zapico et al., 2017).

En la **Tabla 2** se puede ver un ejemplo simplificado de niveles de referencia naturales de CSS y caudal para el arroyo Tajuelo, afluente del río Tajo. En caso de que el lector quiera ampliar sus conocimientos sobre la definición de niveles de referencia, existen muchos ejemplos en la literatura internacional (Bilotta et al., 2010; Bilotta y Brazier, 2008; Howard and Loch, 2019; Messina and Biggs, 2016; Zapico et al., 2017).

Independientemente del método usado para definir los dos niveles de referencia naturales, la monitorización tiene que durar al menos dos años y, a ser posible, que estos sean representativos en términos de precipitación anual en base a las series

locales o regionales con más años registrados, es decir, la erosión está totalmente condicionada por la cantidad de lluvia que se produce; por tanto, si la monitorización tiene lugar solo en años muy secos o muy lluviosos, no va a dar una imagen real de cómo operan los procesos hidrológicos y sedimentarios de forma natural en la zona.



Figura 8. Vista de un muestreador automático no electrónico basado en botes sifonados localizados a diferentes alturas, llenándose durante una crecida en el río Tajuelo, afluente del Tajo.

Tabla 2. Ejemplo simplificado de niveles de referencia naturales (*baseline*) de CSS y caudal, medidos localmente para el río Tajuelo, afluente del Tajo, establecido mediante valores promedio. Más información sobre valores máximos y mínimos y otros aspectos se puede encontrar en (Zapico et al., 2017).

estación	CSS (g l ⁻¹)		Q (m ³ s ⁻¹)	
	caudal	crecida	caudal	crecida
	base		base	
invierno	0.34	3.46	0.23	0.7
primavera	0.39	3.52	0.63	5.09
verano	0.29	2.43 ^a	0.09	0.12
otoño	0.3	2.43 ^a	0.075	0.15

^a. En el artículo de referencia (Zapico et al., 2017) no había datos suficientes para estos periodos, así que se aplicó un promedio del mismo.

2.2. Cómo proceder en los casos en que una explotación ya esté funcionando

Será muy común que empresas que quieran apostar por este tipo de control ambiental basado en valores de referencia medidos localmente, ya tengan la explotación abierta y, por tanto, no puedan medir estos valores, dado que las laderas ya están afectadas por movimiento de tierras y el curso fluvial ya está recibiendo escorrentías de la zona alterada. En estos casos existen varias opciones para medir los parámetros necesarios de forma local:

- Para la tasa de emisión anual de laderas naturales se buscará otra superficie donde medir, próxima a la explotación y cuyos usos del suelo (arbolado, cárcavas naturales, pasto...) representen alguno de estos dos escenarios: i) situación mayoritaria del paisaje circundante actual; ii) situación anterior a la explotación. En el segundo supuesto, los usos y superficies anteriores a la explotación se pueden obtener gracias a fotos históricas georreferenciadas. Esta información se puede conseguir fácilmente de repositorios de ortofotos públicos. Por ejemplo, en España, se pueden consultar en la Fototeca Digital del Instituto Geográfico Nacional (<http://fototeca.cnig.es/>). Para decidir cuál de los dos escenarios usar como referencia, se recomienda que este sea acordado con las autoridades encargadas de hacer seguimiento ambiental.
- Los valores de caudal y CSS del curso fluvial, se medirán en el mismo cauce que ya recibe las escorrentías mineras, pero no donde se produzca el vertido, sino aguas arriba, lo más cercano posible al punto de las emisiones de la explotación. Otra opción sería medir los valores en otro curso fluvial local que reciba aguas de una cuenca similar a en la que se sitúa la superficie explotada, en términos de usos del suelo y tamaño. Sin embargo, esta segunda opción

puede ser complicada, por la dificultad de encontrar ese curso fluvial y también porque, en caso de encontrarlo, se podría situar lejos de la explotación, lo que incrementaría los costes de mantener ese punto de muestreo.

3. Fase activa de una explotación minera

3.1. Diseño, construcción y mantenimiento de balsas de decantación

Una vez que la explotación está en funcionamiento y, por tanto, se puede producir un impacto por exceso de sedimento emitido al exterior, las empresas tienen que llevar a cabo acciones para el control de la erosión y, a día de hoy, las balsas de sedimentación (**Fig. 9**) son la medida más efectiva (Albert et al., 1988; Garbarino et al., 2018). El objetivo de estas balsas es retener el agua y el sedimento cuando haya un evento de lluvia. Tras dicho evento, y una vez que el sedimento se ha decantado en el fondo de las mismas, se vierte el agua al curso fluvial con valores de CSS inferiores a los que tenía la escorrentía inicial.



Figura 9. Momento en que los operarios vacían el sedimento retenido por una de las balsas de sedimentación en el interior de una mina. Estas balsas, durante un episodio

de lluvia, retienen el agua y el sedimento producido, decantan la mayoría de este sedimento y luego liberan agua con valores de CSS inferiores a los iniciales.

En la mina activa de caolín María José, situada en la periferia del Parque Natural del Alto Tajo, se ha demostrado que este tipo de medida tiene una eficiencia cercana al 98% en la retención de sedimento. El resultado final se traduce en unas tasas razonables de emisión de sedimentos, en este caso, de $5.6 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Zapico et al., 2021b). En la **Fig. 3** se puede ver una comparación de esta tasa con otros valores medidos localmente. El éxito de esta medida se basa en dos factores que toda explotación debería tener en cuenta:

- La **construcción de varias balsas** en el interior de la explotación. Normalmente se suele construir una única balsa en las zonas de menor cota de la explotación, para que retenga un gran volumen de agua y sedimento. Esta aproximación presenta dos problemas: i) concentrar gran cantidad de sedimento y agua en un sólo punto introduce un alto riesgo ambiental y humano porque, en caso de rotura, se produciría la liberación de todo su contenido, amenazando todo lo situado aguas abajo; ii) estas balsas se suelen dimensionar pensando en un único evento de precipitación de grandes proporciones, que arrastraría gran cantidad de sedimento. Pero este supuesto obvia los sedimentos producidos por episodios de precipitaciones ordinarios, que poco a poco van llenando la balsa. Así las cosas, cuando se produce ese evento extraordinario, la balsa está parcial o totalmente llena y sin capacidad de retención.

Por eso, es mejor construir varias balsas y más pequeñas a lo largo de todo el interior de la explotación, planificando su gestión y vaciado según proceda. De esta forma, se compartimentarán las escorrentías y se reducirán los riesgos en caso de que se produzca la rotura de alguna de ellas. Además, al estar dividida

toda la explotación en subcuencas, las balsas tienen que gestionar menos cantidad de agua y sedimento, aumentando así su capacidad de retención. Este sistema de balsas interconectado se emplea con éxito en minas activas de caolín de la periferia del Parque Natural del Alto Tajo (**Fig. 10**). La capacidad efectiva de cada balsa se debería calcular siguiendo métodos hidrológicos y de erosión estándar; por ejemplo, el método del número de curva o ecuaciones de tipo MUSLE. Cuando sea posible, habrá que construir las balsas con forma meandriforme, ya que favorecen la sedimentación y la decantación, al reducir la velocidad del agua.

- **Mantenimiento continuo.** El agua tiene que ser evacuada progresivamente por los operarios, desde las balsas más cercanas al frente hacia las más alejadas. De esta forma, el sedimento con granulometría mayor se retendrá antes, y a las últimas balsas sólo llegará el sedimento más fino, y más fácil de ser transportado por un curso fluvial. El mantenimiento tiene que considerar también que, si las balsas alcanzan un punto de llenado crítico, que reduce su capacidad de retención, tienen que ser vaciadas, es decir, no hay que esperar a que se hayan llenado en su totalidad. Este umbral suele estar en torno al 75% de la capacidad de la balsa. Estas labores exigen que los trabajadores de una mina estén pendientes del sistema de balsas continuamente y planificando las labores de mantenimiento en función de su estado de llenado y de las previsiones meteorológicas. Por tanto, estas tareas tienen que estar contempladas en el plan de labores de la explotación. Queda así obsoleta la idea, extendida, de que las balsas de sedimentación son un método pasivo para el control de la erosión, que solo requieren un diseño inicial y su construcción.

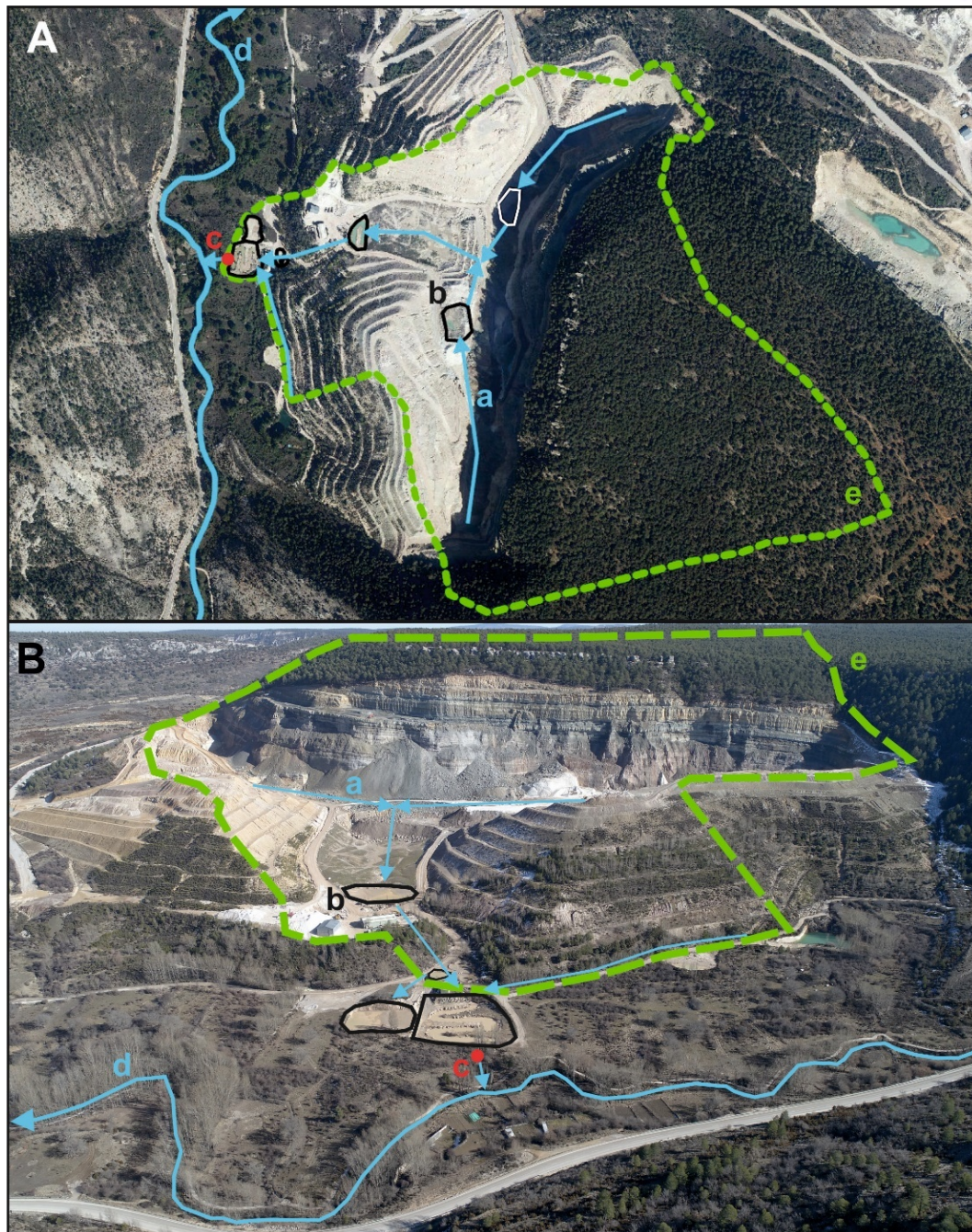


Figura. 10. Ortofoto de 2018 (a) y foto oblicua de 2019 (B) de la mina María José. (a) Dirección de las escorrentías; (b) balsas de sedimentación con procesos de mantenimiento; (c) estación automática hidrológica y sedimentaria; (d) río Tajuelo; (e) delimitación de la cuenca en la que se sitúa la zona activa de la mina. Ortofoto del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) y foto oblicua tomada por DGDRONE. Figura tomada de (Zapico et al., 2021b).

3.2. Monitorización mediante estaciones hidrológicas y sedimentarias automáticas

Las balsas son el elemento central que permite controlar las escorrentías mineras y reducir la emisión de sedimentos a la red fluvial a unos niveles aceptables, sobre la base de las características del contexto local. Sin embargo, por sí solas, no pueden demostrar su grado de éxito. Es decir, las escorrentías mineras, una vez han pasado por el sistema de balsas, y justo antes de ser vertidas aguas abajo, tienen que ser monitorizadas con una estación hidrológica y sedimentaria automática de alta resolución temporal (**Figs. 10 y 11**). En ella se medirá de forma continua la cantidad de sedimento y agua con los siguientes sensores: uno para registrar turbidez (NTU) y otro para la altura de lámina de agua (m). También se instalará un pluviómetro (de pulsos) lo más próximo a la estación. Un *data logger* almacenará los datos brutos de estos tres sensores para un intervalo de segundos o minutos (Zapico et al., 2018), y luego se transformarán mediante ecuaciones de calibración a datos reales (Béjar et al., 2018; Bilotta y Brazier, 2008; Grove et al., 2015; Moliere et al., 2005; Zapico et al., 2018). De esta forma los NTU se convierten en $g\ l^{-1}$ (CSS), la altura de la lámina de agua en m pasa a $m^3\ s^{-1}$ (caudal) y los pulsos del pluviómetro a mm (cantidad e intensidad de la lluvia). Las ecuaciones de calibración se tendrán que definir localmente con muestras tomadas directamente en el punto de medición. Además, los datos recogidos por estos sensores tendrán que ser validados/corregidos según varios condicionantes que presentan estas estaciones, tales como: la mayoría del tiempo no están sumergidos en agua y están sujetos a factores externos que pueden registrar falsos eventos; dependiendo del sensor usado, este puede no funcionar si no está totalmente cubierto por agua; o, dependiendo del sensor elegido, este puede tener un rango de medición limitado que no registre valores superiores al mismo (Zapico et al., 2021b). Esta estación podrá ser la misma que se usó

en la definición de los niveles de referencia y también podrá ser usada posteriormente para evaluar el desempeño de la explotación una vez se restaure.

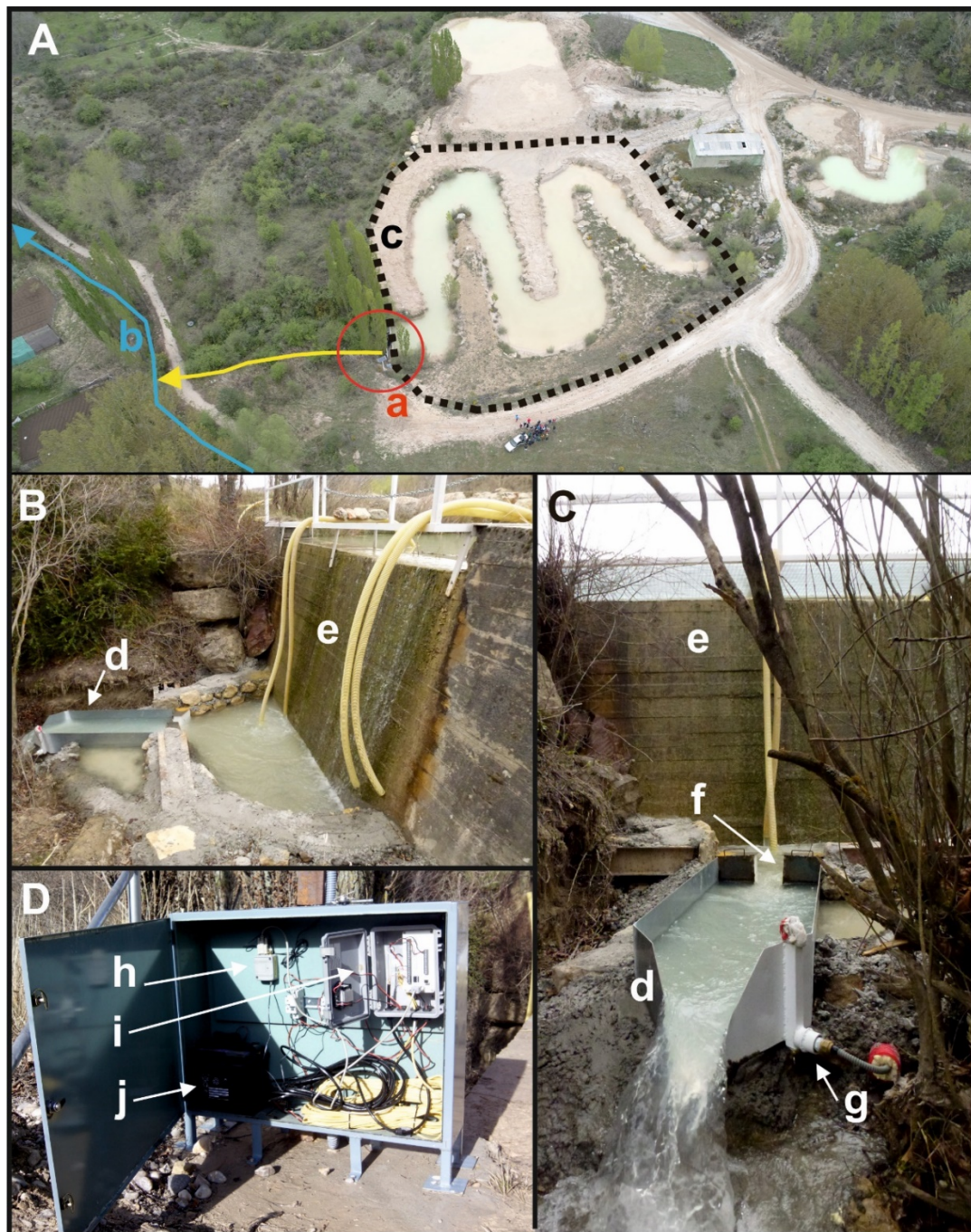


Figura 11. Estación de monitorización hidrológica y sedimentaria automática en la mina María José (CAOBAR, S.A.). (A) Foto oblicua de la estación hidrológica (a) localizada entre el arroyo Tajuelo (b) y la balsa minera más aguas abajo (c); (B) vista en detalle de la estación compuesta por un *flume* (d) y un dique (e) que cierra la balsa; (C) vista en detalle de los sensores instalados en el *flume*: turbidez y temperatura (f) y presión (g); (D) cajón con dispositivo de telemetría de CathTheData (h), un *data logger* (i) y una batería (j) alimentada por un panel solar. Foto oblicua tomada por DGDRONE. Figura extraída de (Zapico et al., 2021b).

Cuando una explotación minera está activa y se tiene que conocer su respuesta hidrológica y sedimentaria frente a la erosión, no es viable realizar la monitorización con métodos manuales y puntuales. El sistema de balsas con tareas de mantenimiento que debería tener cada explotación, asumiendo la problemática descrita en este documento, va a dar lugar a un régimen hidrológico y sedimentario complejo y diferente al de los paisajes naturales. Solo se podrán conocer sus procesos midiendo de forma continua, y a una escala temporal de minutos. Para ilustrar la complejidad de este sistema, a continuación se muestran algunos datos de la mina activa María José, en la periferia del Parque Natural del Alto (Zapico et al., 2021b):

- El 60% del tiempo no hay vertidos, en torno al 20% hay eventos de una magnitud significativa en términos de caudal y que llevan sedimento y durante el periodo restante se producen evacuaciones de agua de escaso caudal y contenido de sedimento.
- La mayoría de las evacuaciones de agua desde la explotación van a ser en ausencia de periodos de lluvia y controladas por los operarios, con el objetivo de manejar las escorrentías y reducir la cantidad de sedimentos que llevan. Es decir, cuando se prevé que va a tener lugar un evento de precipitación, las balsas se vacían y el agua con menor contenido de sedimento se vierte al curso fluvial. Durante el evento de precipitación, que es cuando la superficie es más susceptible a la erosión, no sale agua de la zona explotada, dado que queda retenida en las balsas. Una vez que el sedimento es decantado, y antes de que ocurra otro episodio de lluvia, el agua se vierte al curso fluvial con una baja CSS (eventos de tipo a en **Fig.12**). También hay otras evacuaciones de agua desde la explotación, asociadas a labores de mantenimiento, que, aunque son escasas, hay que tener controladas (eventos de tipo c en **Fig.12**). Por otra parte, puede darse el caso de que eventos de precipitación de larga duración y/o intensidad puedan superar la capacidad de retención de las balsas y se produzca salida de

agua y sedimento durante el evento de lluvia (eventos de tipo *b* en **Fig.12**). Esto es una situación no deseada pero inevitable y que, sin embargo, suele entrañar bajo riesgo, ya que, en esas situaciones, el curso fluvial de forma natural suele llevar también gran cantidad de agua y sedimento.

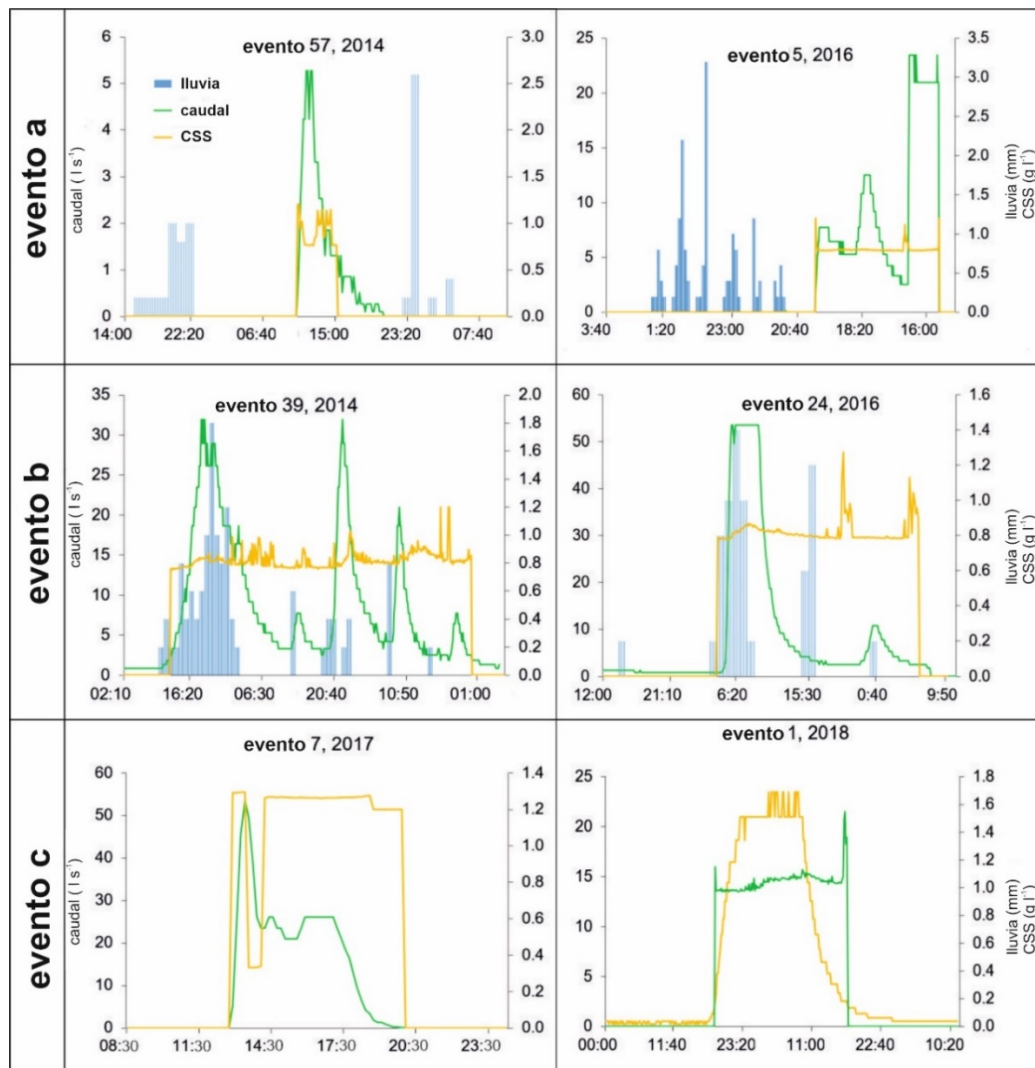


Figura 12. Ejemplos de eventos de escorrentía desde la mina: (a) principalmente después de un evento de precipitación; (b) principalmente durante el evento de precipitación; (c) durante labores de mantenimiento en la mina. Figura extraída de (Zapico et al., 2021b).

Todos estos datos dan una idea de lo difícil que es prever cuándo va a haber una salida de agua desde la explotación minera; solo se puede hacer una monitorización útil con estaciones automáticas y de alta resolución temporal como la descrita anteriormente.

3.3. Definición de alertas de posibles desequilibrios o contaminación a escala de evento y anual

Los valores instantáneos de CSS y de caudal obtenidos de la estación durante la fase de explotación tendrán que ser evaluados según los valores de referencia naturales definidos en el apartado **2.1. Parámetros que necesitan definir niveles de referencia en relación a la producción de sedimentos y cómo medirlos**. Cada parámetro corresponderá también a una escala temporal:

3.3.1. Escala de evento

La escala de evento (minutos-horas) tiene como objetivo calcular el posible incremento instantáneo en % en los valores naturales de CSS, usando como referencia una línea base del curso fluvial que recibe las escorrentías de una explotación, pero no solo comparando los valores de CSS, sino también teniendo en cuenta sus caudales; es decir, en muchos casos el caudal procedente de una superficie afectada por movimiento de tierras es muy inferior al de un curso fluvial natural que recibe sus aguas, por lo que para calcular qué incremento se puede producir, hay que tener en cuenta también los caudales. Una comparación directa de valores de CSS no es realista desde un punto de vista hidrológico, dado que se trata de dos cuerpos de agua diferentes en términos de cantidad.

Una vez hecha la comparación, en caso de que se produjera un incremento en la CSS no significa de forma automática que haya un impacto, dado que esto depende de muchos otros factores, entre ellos el más importante es el tiempo de duración de ese incremento conocido como “tiempo de exposición” (Bilotta y Brazier 2008). Una “alteración puntual” objeto de alarma se producirá cuando exista un incremento tal que, mantenido un determinado tiempo, haga que el exceso de sedimento aportado por la explotación no sea transportado por el curso fluvial, sino que comience a sedimentarse de forma localizada en su desembocadura, afectando a la estructura del lecho, y por

tanto a sus ecosistemas; es decir, hay que definir para qué tiempo de exposición un determinado incremento en la CSS ocasionado por una explotación minera comienza a generar sedimentación, en vez de ser transportado. Estos dos umbrales (incremento de CSS y tiempo de exposición) se deberían de medir localmente y acordar con las autoridades competentes.

3.3.2. Escala anual

La escala anual compara el total del sedimento en suspensión producido en un año por el uso de suelo “actividad extractiva” con el valor de referencia que represente la producción de sedimentos natural de los diferentes usos del suelo que hubiera antes de la misma o alrededor suyo, como ya se explicó anteriormente. Un incremento en esta tasa anual supondría hablar de “situación de contaminación”. Estas tasas anuales se consiguen al totalizar los valores instantáneos de CSS y caudal y asignarlos a la superficie que ocupa una mina.

Para estos cálculos se asume que el sedimento producido por una explotación activa con balsas de sedimentación con mantenimiento continuo es de pequeño tamaño y solo se produce en suspensión. El material de mayor tamaño y que es transportado como carga de fondo queda retenido en su totalidad en el sistema de balsas. De hecho, este tipo de sedimento suele quedar retenido en las primeras balsas, en las localizadas cerca del frente, y nunca llega a la balsa final.

Como ya se ha señalado anteriormente, los procesos hidrológicos y sedimentarios naturales son complejos y pueden variar a lo largo del año por lo que también pueden variar las tasas de erosión natural. En esta situación conviene definir un incremento en % sobre la tasa natural de referencia que se puede tolerar, y que se debe acordar con las autoridades competentes. Su definición también dependerá de las características de la masa de agua a afectar (Howard y Loch 2019).

3.3.3. Procedimiento de detección de contaminación por exceso de emisión de sedimentos a la red fluvial en zonas mineras

Como se ha podido ver en los apartados 2 y 3, llegar a definir cuándo se está produciendo algún tipo de impacto por exceso de emisión de sedimento en una zona con movimiento de tierras, requiere tener en cuenta muchos aspectos: funcionamiento de los procesos naturales, actividades de control de la erosión de la explotación, uso de sensores calibrados y procesamiento de datos, o trabajar a varias escalas, entre otros. Así que, tener todo bajo control y obtener datos fiables en los que basar la toma de decisiones, puede requerir mucho tiempo, que, en muchos casos, va a significar que cuando se haya detecte algún problema de contaminación o alteración, este ya se habrá producido en su totalidad y no se podrán tomar medidas para solventarlo sin causar daños. El objetivo tiene que ser detectar estos problemas en su etapa inicial y actuar en consecuencia.

Un ejemplo de cómo trabajar con todo este complejo entramado de elementos, casuísticas y variables es el sistema patentado (ES2847259): “Procedimiento de detección de contaminación por exceso de emisión de sedimentos a la red fluvial en zonas mineras” (Zapico, 2022). Dicho procedimiento consiste en un sistema de ecuaciones y relaciones, que, alimentado correctamente por los datos de los sensores de una estación, valores naturales de referencia y el resto de condicionantes, permite conocer de forma instantánea y automática si se está produciendo alguna alteración puntual a escala de evento o si el funcionamiento de la explotación está acercándose a una situación de contaminación en términos anuales. Actualmente varias instalaciones ya cuentan con este sistema patentado mediante el servicio integrado de recogida y procesamiento de datos y generación de alertas llamado CathTheData. Se encarga de leer los datos de las estaciones, procesarlos en base a lo definido por el procedimiento patentado, y mostrar en una plataforma online lo que sucede en tiempo real. También

genera alarmas personalizadas de las situaciones de riesgo, que son enviadas al momento a los dispositivos móviles de los técnicos responsables.

4. Fase de cierre y restauración

Aquellas zonas de una explotación minera en la que la actividad cesa tienen que ser restauradas atendiendo a lo dispuesto en el ya citado Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras, y siguiendo en último término las condiciones concretas establecidas en la resolución de aprobación de su plan de restauración.

El primer paso para acometer un proyecto exitoso tiene que ser generar un relieve estable capaz de sustentar los futuros usos del suelo que se hayan proyectado en el plan de restauración. Mayoritariamente, en zonas de alto valor ecológico el objetivo es establecer un ecosistema funcional, capaz de restablecer los procesos previos a la perturbación y albergar las especies animales y vegetales propias de la zona. En este contexto, y dado el problema descrito en la introducción sobre la pérdida de red de drenaje y su implicación en la inestabilidad del terreno, queda claro que cualquier actuación de restauración debe empezar por remodelar un relieve estable con base geomorfológica e hidrológica, donde el elemento central tiene que ser una red de drenaje tridimensional. Este apartado se centra precisamente en cómo generar ese relieve estable y en su monitorización. Sin embargo, cualquier trabajo de estas características tiene que ser completado con el resto de actuaciones típicas de cualquier proyecto de restauración ecológica en zonas afectadas por movimiento de tierras: reposición de suelos y revegetación. Existen varias guías que tratan estos temas en profundidad, siendo la más reciente la Guía Práctica de Restauración Ecológica (Mola et al., 2018).

Podrá darse el caso en el que muchas explotaciones mineras tengan dificultad en introducir estos principios geomorfológicos en el remodelado del relieve, dado que llevan años, o décadas, siendo planificadas para ser restauradas en terrazas, con grandes

superficies ya ocupadas o preparadas para este sistema de rehabilitación. En estos supuestos, existe mucha incertidumbre de cómo van a responder estas restauraciones en el medio y largo plazo (**Fig. 13**). Sin embargo, existe una batería de medidas enfocadas a un mejor control hidrológico que pueden aumentar su estabilidad, y que se abordarán en este apartado.



Figura 13. Ejemplos de una restauración en terraza exitosa en términos de estabilidad y establecimiento de vegetación durante más de una década, pero que finalmente terminó experimentando un pequeño deslizamiento.

4.1. Restauración en terrazas

A continuación, se van a enumerar una serie de recomendaciones enfocadas a mejorar la gestión hidrológica cuando una restauración tenga que ser realizada en terrazas:

a) Drenajes subterráneos. En zonas de pendiente elevada y el material objeto de restauración sea fino y más susceptible de erosión, conviene, antes de construir las terrazas, incluir drenajes subterráneos para que el agua infiltrada, o que entre a la escombrera desde zonas circundantes, se dirija a través de ellos. Esto permitirá que el

agua fluya a través de la escombrera, evitando así posibles saturaciones en el interior de la restauración que, en caso de suceder, podrían originar movimientos en masa, tales como deslizamientos. Esto cobra más importancia si la escombrera se va a asentar en una zona de vaguada o fondo de valle, es decir, una zona de drenaje natural claramente marcada, donde en eventos de precipitación se va a concentrar grandes cantidades de agua.

En la **Fig. 14** se puede ver un ejemplo de restauración en terrazas (b) que tiene unos 30 años de antigüedad y que no ha experimentado ningún deslizamiento ni proceso erosivo superficial importante. Cuenta con un drenaje subterráneo cada 25 m situados sobre la superficie de asentamiento; cada uno tiene una anchura de 2 m, una altura mínima de 5 m, y está compuesto de un tubo, grava y geotextil. En la misma figura se puede observar otra escombrera restaurada en terrazas y que ha experimentado un evidente deslizamiento rotacional (b) sin drenaje subterráneo y ubicada en el eje principal de un arroyo que se ha deslizado. Con el paso del tiempo experimentó un evidente deslizamiento rotacional que ya ha sido estabilizado con un proyecto de base geomorfológica (Zapico et al., 2020).

b) Pendientes inferiores a 20 grados. Existe un amplio consenso de que pendientes suaves disminuyen las tasas de erosión y, por tanto, favorecen la estabilidad del terreno y el posterior establecimiento de un ecosistema (Vidal-Macua et al., 2020). La práctica común en minería de restaurar con pendientes de 45°, llamada “vertido directo”, puede ocasionar pequeños deslizamientos y erosión en regueros y cárcavas (**Fig. 15**).



Figura 14. Ejemplo de dos escombreras restauradas en taludes: (a) una de 15 años de antigüedad, situada en el eje principal de un arroyo y sin ningún drenaje subterráneo, y que finalmente terminó experimentando un evidente deslizamiento rotacional; (b) otra de 30 años de antigüedad, situada en el lateral del valle natural y sobre varios drenajes subterráneos, y que en la actualidad permanece estable.



Figura 15. Dos taludes contiguos con diferente ángulo: (A) 20°; (B) 45°. Claramente se puede ver cómo tras un año de su construcción, el primero no presenta ningún signo de erosión, y el segundo tiene pequeños deslizamientos en los bordes de terraza.

El único inconveniente que puede existir a la hora de restaurar un determinado volumen de estériles con pendientes bajas es que no se disponga de espacio. Desde un punto de vista económico, las restauraciones con pendientes suaves no tienen por qué implicar un coste superior si se planifica desde el principio. El incremento en coste puede suceder si se construye un talud de vertido directo de 45° y luego se quiere remodelar. En estas situaciones hay que mover dos veces la tierra y, en muchos casos, las máquinas empleadas, retroexcavadora y bulldozer, también tienen dificultades para remodelar esas pendientes. Por eso, si la construcción de un talud se hace en “capas”, se puede obtener desde el principio y progresivamente una pendiente suave de unos 20°, y todo ello sin implicar un coste superior.

c) Evitar entradas de agua desde cotas superiores. Este es un factor muy importante, porque independientemente del método de restauración usado, este hecho puede hacer fracasar todo el esfuerzo y dinero invertido en cualquier restauración (remodelado, suelo, enmiendas orgánicas o plantación). Este fenómeno suele ocurrir por entradas de agua desde zonas localizadas aguas arriba de los taludes restaurados (**Fig. 16**). Principalmente son cuatro las zonas que ocasionan este tipo de problemas: i) pistas; ii) bermas sin contrapendiente; iii) taludes temporales; iv) zonas de explotación.

Para evitar estos procesos, hay que desviar estas entradas de agua con bermas con contrapendientes o, en caso de zonas activas o escombreras temporales, con diques de tierra que desvíen el agua de escorrentía hacia el sistema de balsas de sedimentación que debe tener cualquier zona en explotación.



Figura 16. Ejemplo de dos restauraciones en terrazas que han funcionado bien hasta que entradas de agua externas las han erosionado: (A) debido a una pista; (B) debido a la construcción de una escombrera temporal. Fotos tomadas por DGDDRONE.

d) Bermas con contrapendientes. Una berma puede gestionar el agua y sedimento producido por un talud. Sin embargo, el problema viene cuando ese agua vierte hacia un talud inferior. Por eso hay que evitar construir bermas planas o con pendiente a favor del talud inferior. Hay que diseñar bermas de al menos 5-10 metros de anchura y con una contrapendiente de entorno al 5% (**Fig. 17**). A su vez, el eje principal de esas bermas tiene que tener una pendiente suave (menor del 10%), lo que permitirá evacuar el agua fuera del sistema de taludes.

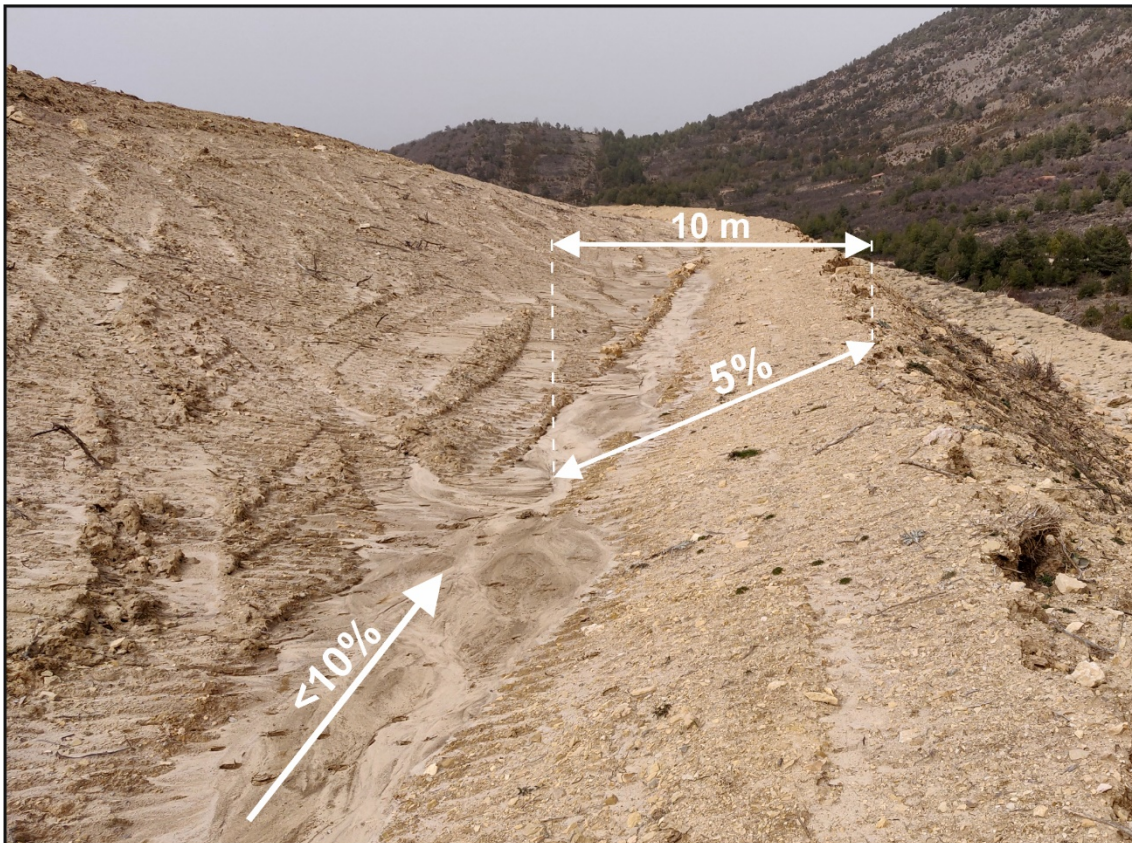


Figura 17. Ejemplo de una berma con contrapendiente que evita que el agua de escorrentía salte al talud inferior. El eje principal de la berma a su vez lleva una pendiente suficiente para evacuar el agua fuera del talud.

4.2. Restauración con base geomorfológica

4.2.1. Fundamentos teóricos

A la hora de aplicar criterios geomorfológicos en una restauración, el elemento central es el diseño de una red de drenaje tridimensional, con perfiles longitudinales cóncavos. Partiendo de esta red de drenaje se diseña el resto de los elementos, replicando los de los paisajes naturales: lomas divisorias entre canales, y laderas y vaguadas de perfil convexo-cóncavo. Todas estas formas van a contribuir a que en el paisaje reconstruido operen procesos hidrológicos y sedimentarios mediante un equilibrio dinámico, produciendo tasas de sedimentos anuales similares a las de las laderas naturales del entorno (Bugosh and Epp, 2019; Martín Duque et al., 2021; Zapico et al., 2018). Superficies restauradas en entornos mineros que no cuentan con estas formas con base geomorfológica, como acabados superficiales en terrazas, suelen experimentar

procesos erosivos activos tales como regueros y cárcavas (**Fig. 18**). Recientemente se ha demostrado que una restauración con base geomorfológica no solo reduce las tasas de erosión hasta valores tolerables similares a los naturales, sino que también aumenta la biodiversidad de especies vegetales respecto a restauraciones tradicionales (Fleisher and Hufford, 2020). Esto se debe a la estabilidad del terreno y a la heterogeneidad de formas introducidas en el paisaje.

Estas restauraciones se diseñan en entornos CAD y, actualmente, la metodología y software más avanzados que permiten diseñar estas formas complejas son GeoFluv y Natural Regrade (Bugosh and Epp, 2019; Martín Duque et al., 2021; Zapico et al., 2018). Dado que el resultado final es una topografía detallada adaptada a las condiciones del terreno, estos diseños tienen mucho margen para adecuarse a condicionantes de la explotación, como, por ejemplo, otras restauraciones en terrazas ya construidas previamente (**Fig. 19**); aunque hay que tener cuidado en las zonas de intersección entre ambos modelos, porque si se producen entradas de escorrentía no controladas, ni previstas en el diseño inicial, se pueden activar procesos erosivos (Martín Duque et al., 2020).

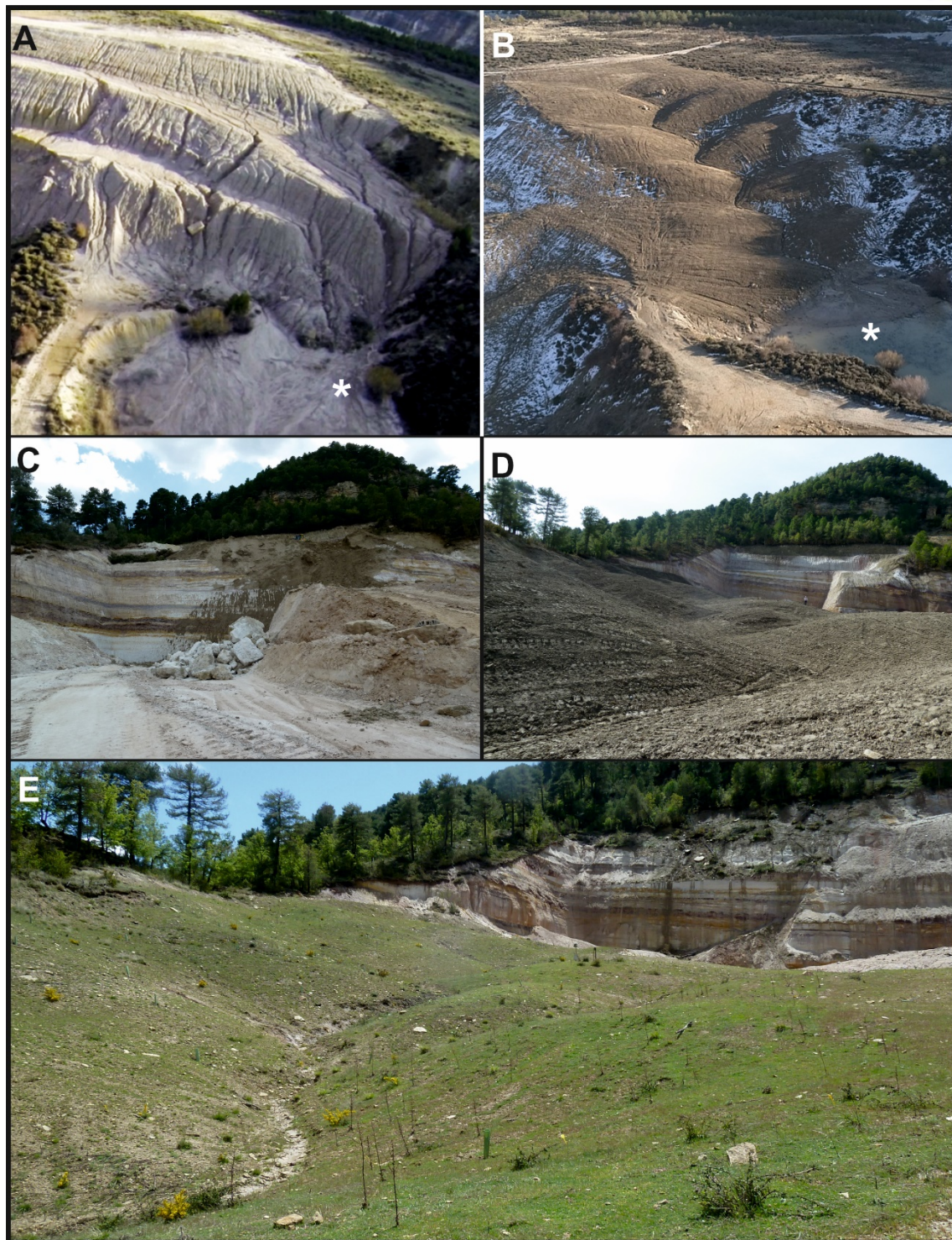


Figura 18. Ejemplos de restauraciones geomorfológicas en minas del Alto Tajo: Nuria (antes, A; después, B) y Machorro (antes, C; después, D; presente, E); (*) posición de la balsa usada como referencia. Fotos A y B de DGDRONE. Figura extraída de (Zapico et al., 2021c).

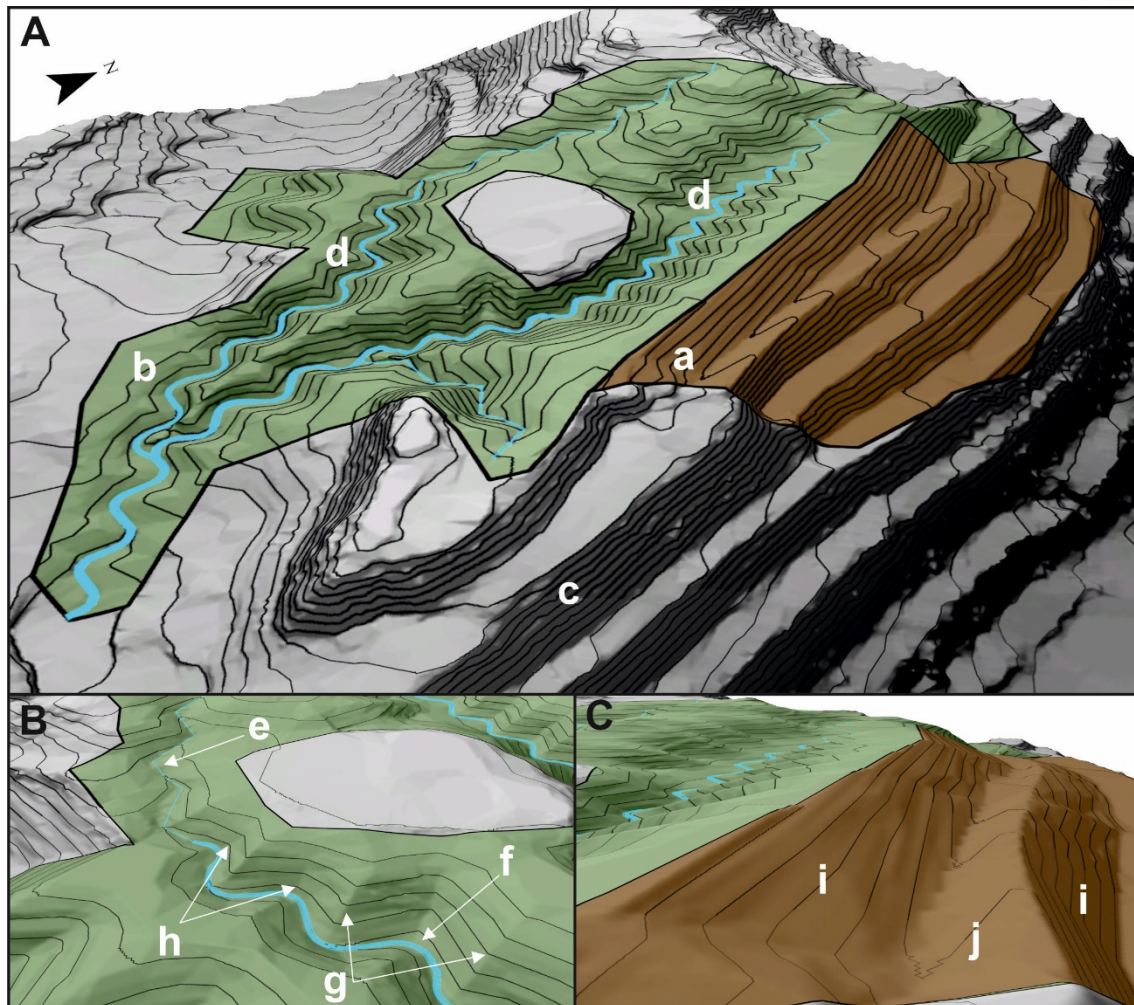


Figura 19. Vistas 3D de un ejemplo de una restauración con base geomorfológica adaptada a zonas restauradas en terrazas: general (A) y detalles (B y C); (a) restauración en terrazas reconstruida; (b) restauración con base geomorfológica; (c) topografía original circundante a la que hubo que adaptar el diseño de restauración; (d) canal principal con un tramo en zig-zag (e) y otro en meandros (f); (g) laderas convexo-cóncavas; (h) vaguadas convexo-cóncavas; (i) taludes; (j) berma con contrapendiente. Figura extraída de (Zapico et al., 2021c).

Los pasos a seguir para construir en campo uno de estos diseños son: movimiento en bruto de tierra, remodelado final de las formas y reposición de suelos. Las dos primeras fases tienen que ser guiadas en campo por un trabajo topográfico de permanente replanteo (**Fig. 20**).

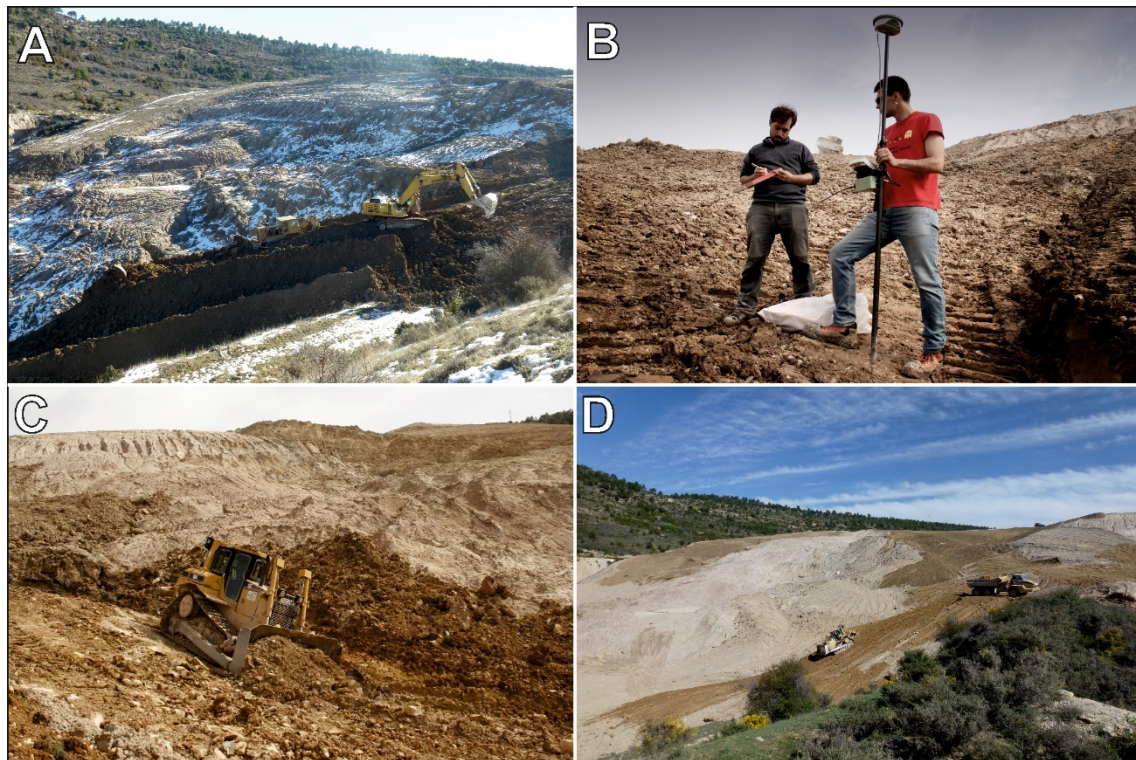


Figura 20. Fases en la ejecución en campo de un proyecto de restauración con base geomorfológica: movimiento en bruto del estéril (A); trabajo topográfico permanente de replanteo (B); remodelado final de las formas del terreno (C); reposición de suelos (D).

4.2.2. Aspectos importantes a tener en cuenta para mejorar su implantación y ejecución

A nivel conceptual, la restauración geomorfológica se desarrolla en las décadas de 1980 y 1990 en Estados Unidos, Canadá y Australia. Sin embargo, la existencia de métodos de base científica, y sobre todo de *software* que permita diseñar paisajes equivalentes a los naturales, no surge hasta el año 2000, con ejemplos destacados en Estados Unidos y Canadá. Existen varias publicaciones que describen en detalle la aplicación de esta metodología (Bugosh and Epp, 2019; Martin Duque et al., 2019; Martín Duque et al., 2020; Zapico et al., 2020, 2018). Por ello, en este apartado, no se va a describir el desarrollo de las distintas fases. Simplemente se quiere llamar la atención sobre una serie de cuestiones que se consideran clave, tras varios años de experiencia y proyectos ejecutados, para evitar fracasos:

a) **Respetar, fielmente, la conexión a un nivel de base estable.** La principal causa de fallo, en muchas restauraciones con base geomorfológica, se debe a que, bien no se identifica un nivel de base estable, bien no se realiza una conexión precisa en elevación y pendiente. El nivel de base va a estar definido por el punto más bajo del canal principal de la restauración, que es donde se va a conectar con la superficie aguas abajo no objeto de restauración. Esta conexión tiene que ser estable, es decir, a la misma altitud y con la misma pendiente, con el fin de evitar cambios bruscos en forma de “escalones” (*knickpoints*). En caso de darse una mala conexión, al producirse esta sobre materiales no consolidados, se van a ocasionar procesos de erosión activos hasta que el canal reajuste todo su perfil longitudinal, y logre una conexión estable (**Fig. 21**).

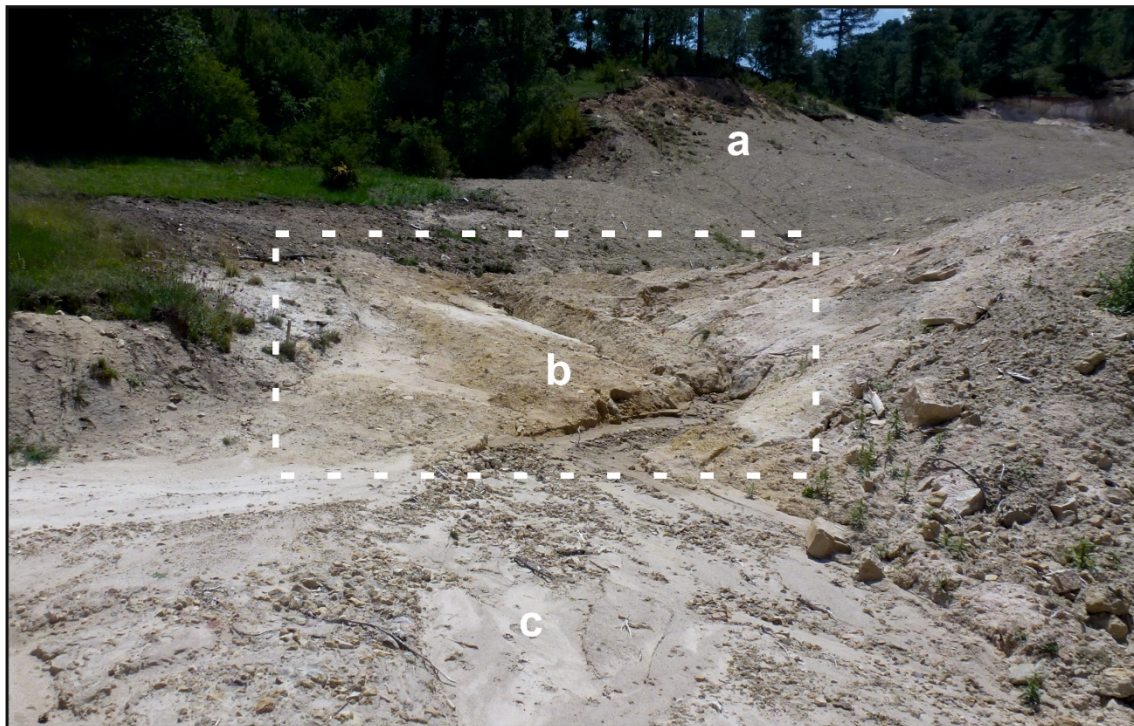


Figura 21. Ejemplo de una restauración con base geomorfológica (a) donde la desembocadura del canal principal se dejó con un “escalón” (b), *knickpoint*, y ha sido erosionada vertiendo sedimento hacia una balsa localizada aguas abajo (c).

b) **Definición de un buen referente geomorfológico y respetar en el diseño la densidad de drenaje establecida como objetivo.** Quizás este es uno de los aspectos más complicados a la hora de querer aplicar esta técnica. El referente tiene que ser un

paisaje estable, con un sustrato de materiales no consolidados similares a los que se van a usar en la restauración y desarrollado en un clima parecido al dominante en la superficie a restaurar. Su densidad de drenaje va a definir el valor mínimo de canales por unidad de superficie que debe de tener la futura restauración (**Fig. 22**). Diseños con valores inferiores activarían procesos de erosión que tratarían de recuperar la densidad característica local. Otro error común puede surgir al querer reproducir la red de drenaje que había en la superficie afectada antes de la mina. El motivo es que esos materiales suelen ser consolidados, de características diferentes a los estériles post-minería, y, por tanto, menos susceptibles a la erosión. El resultado final es que son capaces de gestionar el agua de escorrentía con un menor número de canales por unidad de superficie, en comparación con una superficie restaurada. En estos casos, los materiales no consolidados van a ser más susceptibles a la erosión y, en consecuencia, necesitarán una densidad de drenaje mayor.

c) Evitar entradas de aguas de zonas localizadas aguas arriba de la restauración geomorfológica. Las restauraciones de base geomorfológica, al igual que las convencionales, están dirigidas a tener una cubierta vegetal protectora. Cuando esta existe, las superficies son estables ante la precipitación directa de lluvia. Sin embargo, ni siquiera con una cubierta vegetal protectora unas laderas restauradas están preparadas para acoger entradas de escorrentía concentrada, por ejemplo, desde pistas o superficies impermeables. En estos casos, estas entradas de escorrentía deben estar dirigidas a cauces fluviales, diseñados para acoger estas entradas (Martín Duque et al., 2020).

Lo ideal sería evitar cualquier entrada de agua externa desviando ésta hacia otras zonas de la explotación. En caso de que tenga que haber una entrada de agua externa, tiene que estar contemplada en el diseño inicial y por tanto variar el número y tamaño de los canales, así como sus perfiles.

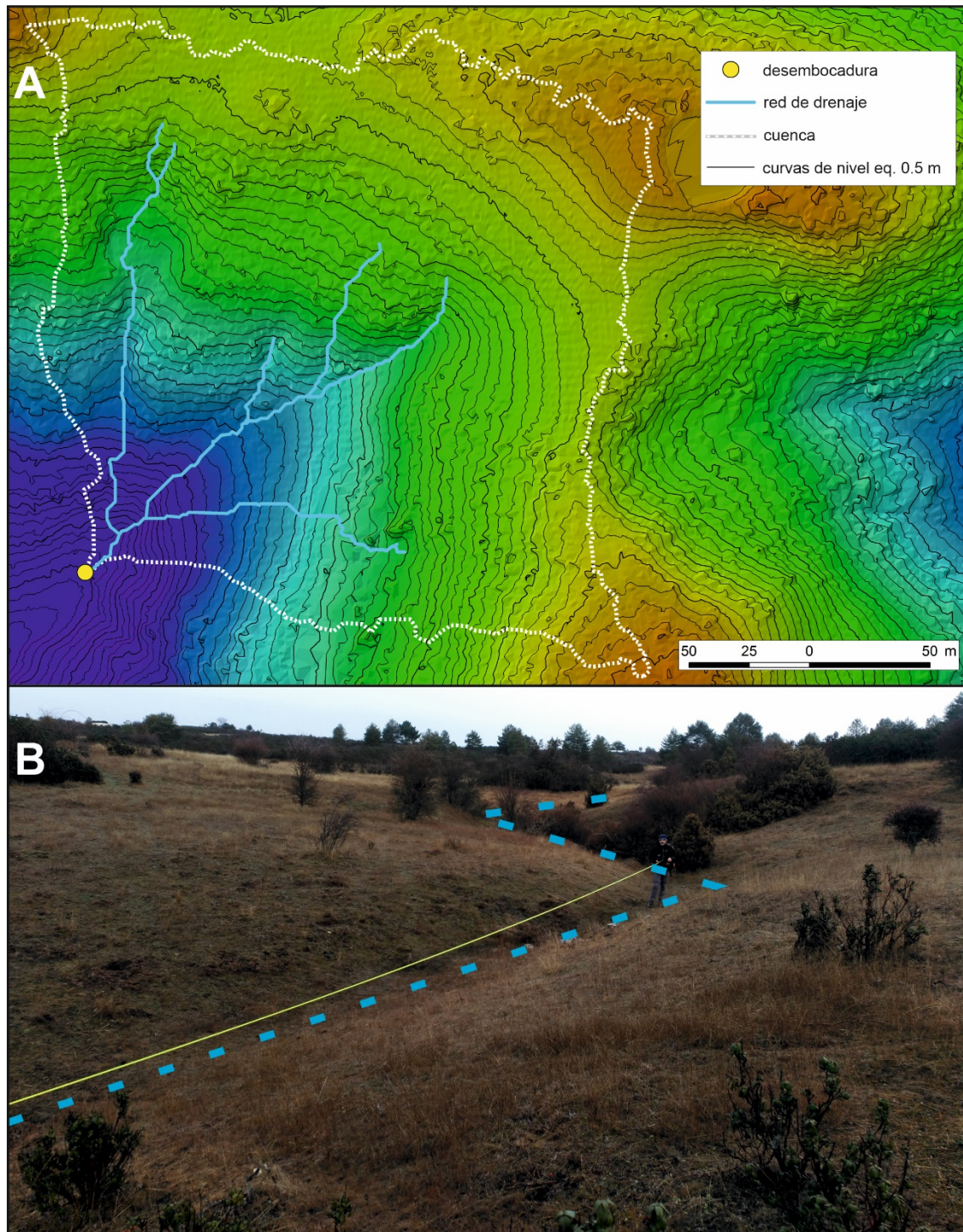


Figura 22. Ejemplo de referente geomorfológico para la zona minera del Parque Natural del Alto Tajo. (A) mapa de una de las cuencas usadas para obtener parámetros de entrada sobre un Modelo Digital de Elevaciones obtenido del LiDAR del PNOA; (b) foto del referente en campo en el que se están tomando las dimensiones de un canal natural. Figura extraída de (Zapico et al., 2018).

d) **Remodelar las laderas con perfiles convexo-cóncavos.** Con bastante frecuencia, las laderas construidas con principios geomorfológicos se suelen construir con perfiles

solo convexos, bien porque no se cuida el acabado, bien con el objetivo introducir más material. Para evitar inestabilidad y garantizar funcionalidad se debe ser estricto en el respeto de los tramos cóncavos que indique el diseño (**Fig. 23**).



Figura 23. Ejemplo de laderas en proyectos de restauración con base geomorfológica: (A) laderas solo con perfil convexo en contacto con un canal principal, cuyas bases se han terminado erosionando; (B) ladera con un perfil convexo-cóncavo estable.

e) **Construcción de una balsa/dique de retención de sedimentos durante los primeros años desde su creación.** Como ya se ha comentado, cualquier superficie restaurada tiene siempre un grado inicial de inestabilidad, tanto por la falta de una cubierta herbácea como por reajustes entre el diseño y la construcción, sobre todo, en los canales que conforman la red de drenaje. La estabilización de las zonas restauradas puede durar hasta tres años, y producir un exceso de emisión de sedimentos, fácilmente

retenidos por una balsa (o dique) temporal localizada en la desembocadura de la restauración (**Fig. 24**). En caso de optarse por una balsa, esta tiene que estar pensada para que, al llenarse de sedimento, la superficie restaurada quede conectada de una forma estable con la superficie aguas abajo, es decir, sin “escalones”. Y si se construye un dique, habría que planificar su retirada una vez la superficie esté estabilizada, previa extracción del sedimento que haya retenido.



Figura 24. Vista de una balsa de sedimentación construida en la desembocadura de una restauración minera con base geomorfológica para almacenar los sedimentos erosionados durante los primeros años tras la restauración. En este periodo el terreno se está estabilizando, la vegetación crece, y puede experimentar ajustes.

4.3. Monitorización de una restauración

Cualquier superficie restaurada, independientemente del método empleado, tiene que demostrar su grado de éxito respecto a los objetivos marcados. Desde el punto de vista de la estabilidad, el parámetro que mejor ayuda a cuantificar cómo está funcionando una restauración, es la producción anual de sedimentos totales o *annual total sediment yield*. Para poder afirmar que una restauración es exitosa este valor tiene que ser similar al producido por una ladera local sin actividad extractiva (en el apartado **2.1**.

Parámetros que necesitan definir niveles de referencia en relación a la producción de sedimentos y cómo medirlos se explica más en detalle). Dicho valor normalmente se expresa en $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ y se puede obtener de varias formas (Fig. 25):

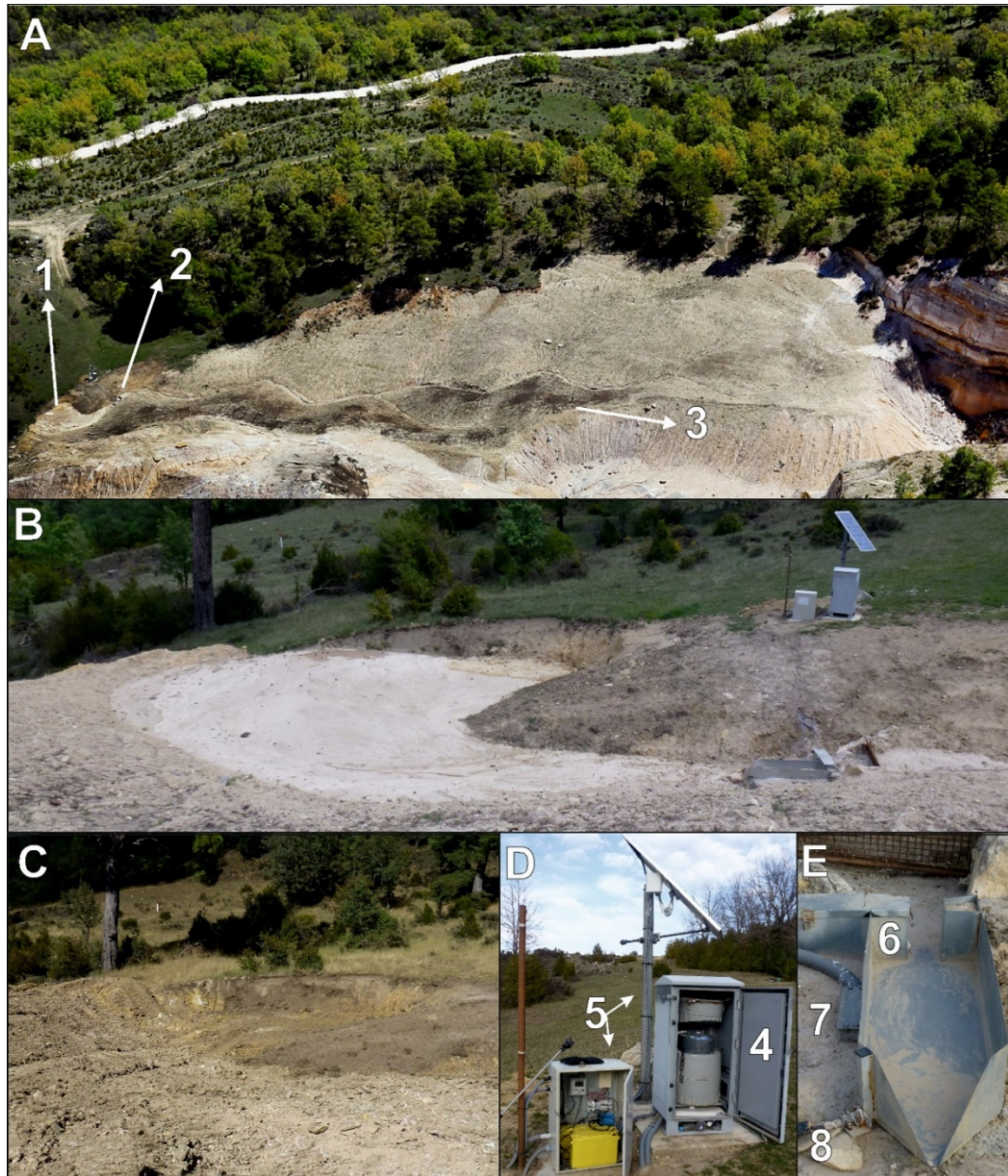


Figura 25. Ejemplos de monitorización de tasas anuales de producción de sedimento en una restauración con base geomorfológica: (A) vista oblicua general donde se puede ver la balsa de sedimentación (1), la localización de la estación hidrológica (2) y la posición del pluviómetro (3); (B) detalle de la desembocadura de la restauración donde se encuentra la estación hidrológica y la balsa llena; (C) vista de la balsa vacía; (D) y (E) son vistas en detalle de la estación hidrológica compuesta por: (4) un muestreador automático ISCO; (5) panel solar, baterías, *data logger* y telemetría; (6) turbidímetro; (7) succionador donde se toman las muestras del ISCO; (8) sensor de presión. (5), (6), (7) y (8) están instaladas en un canal estandarizado tipo *flume*. Figura extraída de (Zapico et al., 2018).

a) **Construcción de una balsa o dique en la desembocadura (Fig. 24-A, B, C).** Estas estructuras, si se diseñan adecuadamente, suponen la herramienta más fiable y barata para obtener valores totales de sedimento. Retienen el todo del material erosionado y su relleno se puede medir de varias formas: i) barras verticales incrustadas en el fondo de la balsa que permitan ir midiendo el material acumulado; ii) comparando topografías, obtenidas con GPS diferencial u otras herramientas/procedimientos de mayor detalle, del antes y después del llenado (**Fig. 26**); iii) mediante el vaciado y pesaje del material retenido por la balsa. Estas estructuras cumplen una doble función ya que también servirán para retener el material erosionado correspondiente al lógico reajuste de la restauración y ausencia de vegetación de los primeros años. Más información en el punto **f** de la sección **4.2.2. Aspectos importantes a tener en cuenta para mejorar su implantación y ejecución.**

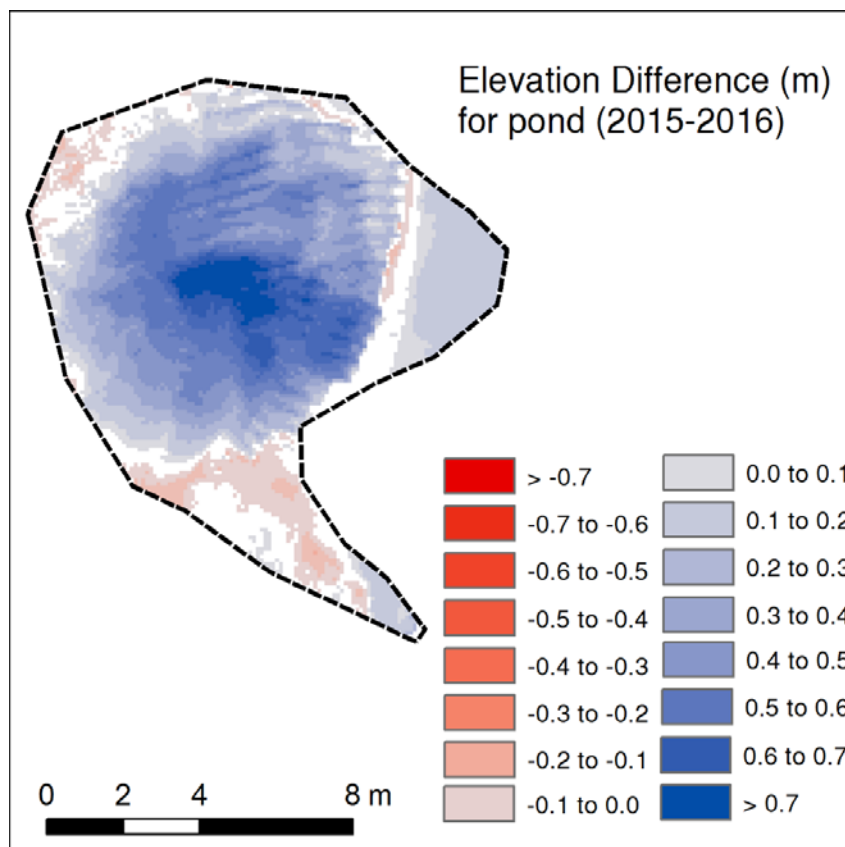


Figura 26. Ejemplo de un mapa obtenido de la comparación de dos topografías, donde se pueden ver los cambios en altura resultantes del llenado de una balsa. Figura extraída de (Zapico et al., 2018).

b) **Instalación de una estación hidrológica y sedimentaria automática y de alta resolución temporal (Fig. 25-A, B, D, E).** Esta medida es la más sofisticada y tiene un coste superior, pero sus datos no solo sirven para obtener valores anuales totales, sino que también permiten hacer un análisis más exhaustivo y detallado del funcionamiento hidrológico, sedimentario y erosivo de una superficie restaurada. Dado que se trata de una estación similar a la utilizada para medir el nivel de referencia natural de un curso fluvial y monitorizar una explotación activa (apartado **3.2. Monitorización mediante estaciones hidrológicas y sedimentarias automáticas**), se puede reutilizar alguna de ellas para esta tarea.

Este equipamiento permitirá, por ejemplo, saber en qué estación del año se producen los sedimentos, o si las tasas se deben a unos pocos eventos importantes o a la suma de varios de ellos. Los datos de precipitación también permitirán: i) conocer la intensidad de lluvia que ocasiona cada evento de escorrentía y con ello saber si altas tasas de sedimento se deben a eventos intensos, situación normal o si por el contrario se asocian a eventos no significativos, lo que indicaría que algo puede estar fallando en la restauración; ii) asociar la cantidad de lluvia producida a la escorrentía generada, y poder así conocer en detalle el coeficiente de infiltración y la cantidad de agua disponible para el desarrollo de la vegetación.

Si además este instrumental se dota con un sistema de recogida y procesado de datos en tiempo real, se podrá detectar de forma instantánea cualquier episodio de desequilibrio o contaminación, en términos de producción de sedimentos y estabilidad, en la superficie restaurada. Más información en el apartado **3.3. Definición de alertas de posibles desequilibrios o contaminación a escala de evento y anual.**

c) **Monitorización topográfica del total de la superficie restaurada.** Actualmente se dispone de multitud de instrumentos/técnicas topográficas que permiten hacer levantamientos de gran detalle y alta exactitud. Dos topografías de una misma superficie

restaurada y correspondientes a periodos temporales diferentes, se pueden procesar con un software SIG o CAD para obtener cambios volumétricos que, convenientemente interpretados, servirán para obtener tasas anuales de producción de sedimento. Quizás la metodología y software más utilizado para este tipo de análisis es *Geomorphic Change Detection* (GCD, 2018; Wheaton et al., 2010), ya que no solo generan datos sobre valores volumétricos, sino que también permiten obtener información cuantitativa sobre el grado de incertidumbre de esos cálculos, debido al error inherente de cualquier topografía. También se obtienen mapas que muestran en qué zonas se produce aumento de volumen (aporte de tierras por movimiento de tierras, sedimentación de material erosionado o acumulación de material deslizado), y en cuales disminución (sustracción por movimiento de tierras, erosión de sedimento o desplazamiento de material deslizado). En la **Fig. 27** se puede ver un ejemplo de estos cálculos. En la figura también se aprecia que estos cálculos de monitorización topográfica se pueden emplear para hacer el seguimiento de una obra de restauración.

Existen varios instrumentos/métodos topográficos de gran detalle y alta exactitud. El equipo más usado tradicionalmente en zonas de movimiento de tierras es el láser escáner terrestre (**Fig. 28**). Este sistema es fiable y permite obtener topografías basadas en nubes de puntos desde el momento en el que se termina el levantamiento, es decir, no requieren post-procesamiento, o requieren muy poco. Las nubes de puntos generadas con este instrumento también pueden ser procesadas para diferenciar fácilmente los elementos de la superficie escaneada. Esto quiere decir que permitirán diferenciar fácilmente el suelo, que es donde se producen los fenómenos erosivos y sedimentarios, de otros elementos presentes en una restauración, como es la vegetación. Sin embargo, su uso requiere posicionar el instrumento en muchas ubicaciones para cubrir toda la superficie, lo que incrementa el tiempo de trabajo en campo y, aun así, es casi inevitable que existan “sombras” (zonas sin datos). Este aspecto es más acusado en restauraciones con base geomorfológicas porque tienen

formas más complejas, a diferencia de una restauración en terrazas con formas rectas y lineales.

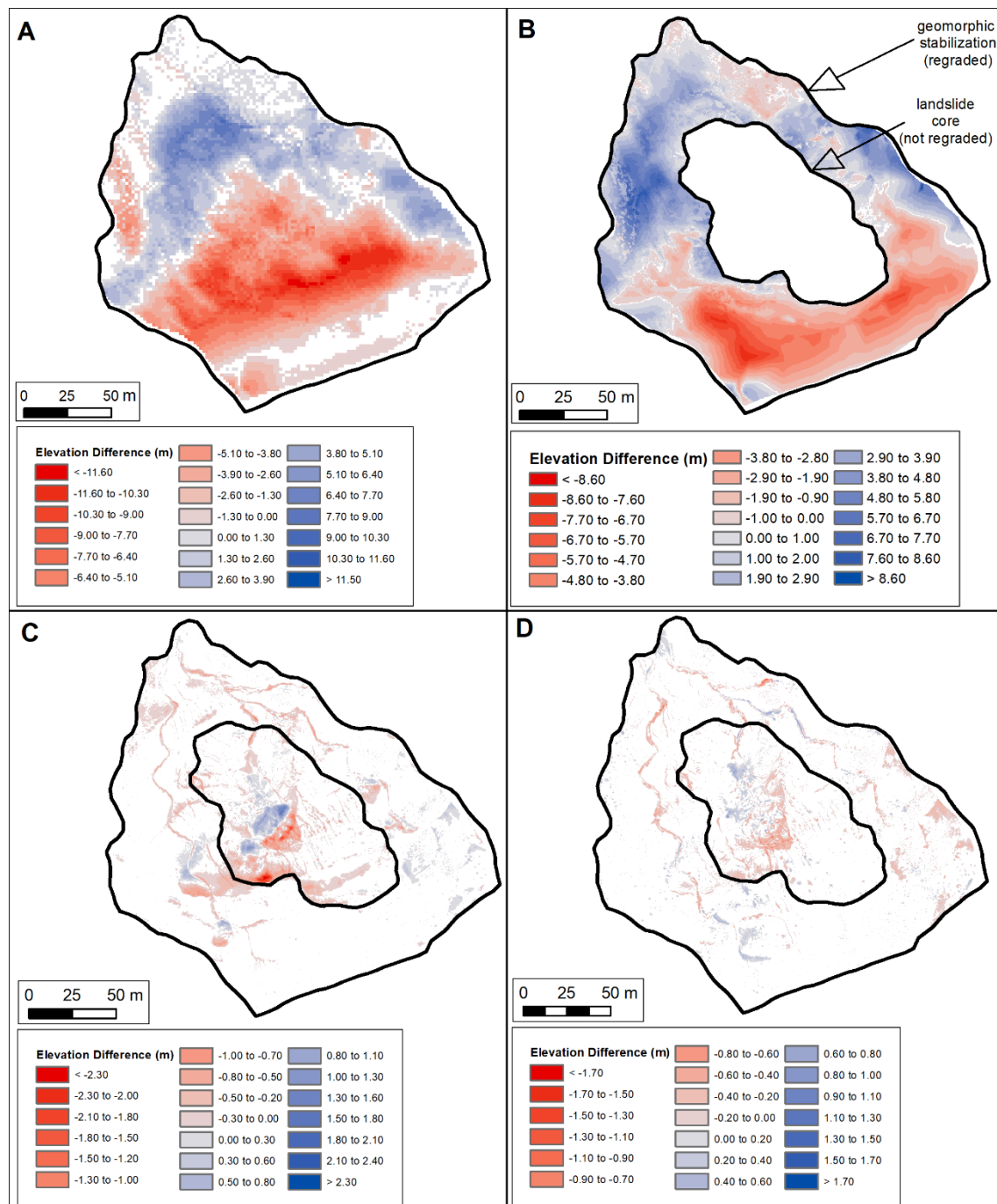


Figura 27. Ejemplos de monitorización topográfica de un proyecto de restauración con base geomorfológica aplicado a una escombrera restaurada en terrazas; (A) movimiento de tierras original por un deslizamiento rotacional en la escombrera en terrazas; (B) movimiento de tierras realizado por las máquinas para ejecutar diseños de restauración con base geomorfológica, con el objetivo de estabilizar el deslizamiento; (C y D) procesos de erosión y sedimentación en el interior del deslizamiento y las zonas remodeladas geomorfológicamente en los dos primeros años tras la ejecución de la obra. Figura extraída de (Zapico et al., 2020).

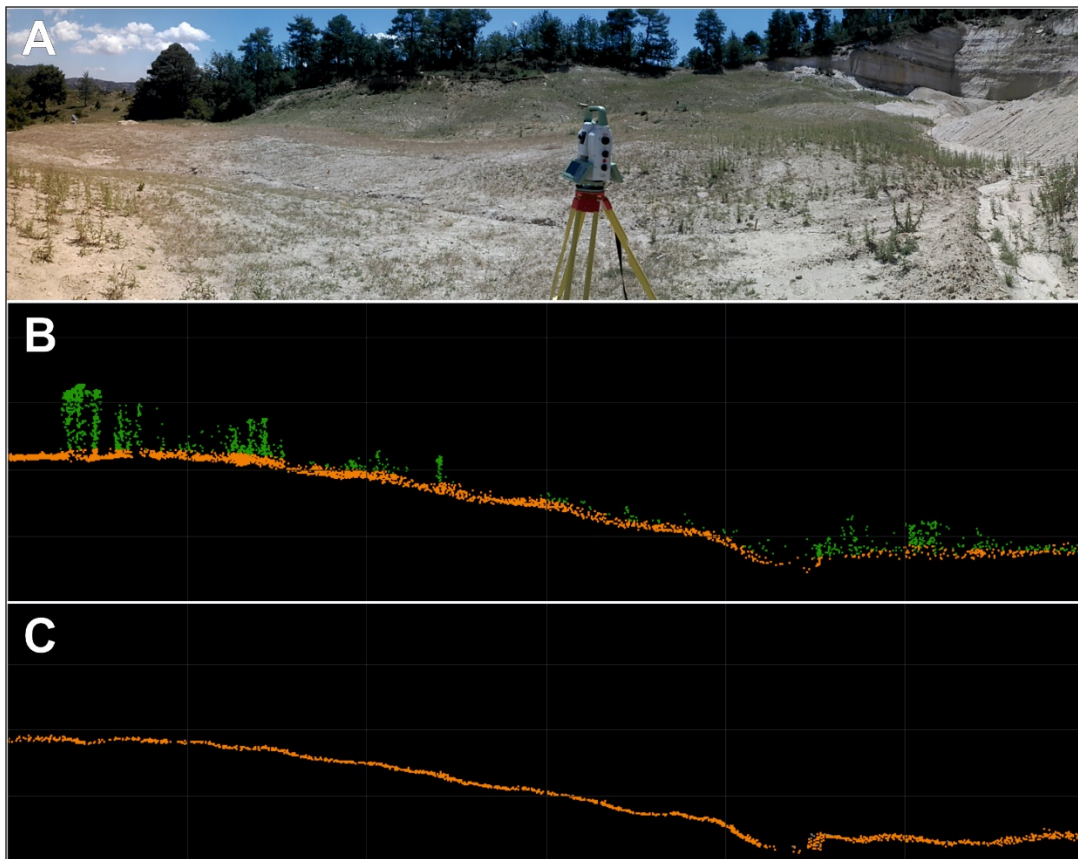


Figura 28. Ejemplo de una restauración con base geomorfológica monitorizada mediante topografías obtenidas con láser escáner (A). Perfiles de parte de la nube de puntos en el que se ve el suelo y la vegetación (B), y sólo el suelo (C).

En la actualidad el uso del láser escáner en zonas mineras está siendo complementado o sustituido con técnicas fotogramétricas aplicadas a fotos tomadas con dron. Los nuevos algoritmos fotogramétricos, *Structure from Motion* (SfM) y *MultiView Stereo* (MVS), implementados en *software* de fácil uso y la posibilidad de tomar fácilmente fotos con drones, han propiciado el auge de esta técnica (Carrivick et al., 2016). Estos algoritmos han traído consigo la semi-automatización de complejos procesos que tradicionalmente requerían de conocimientos técnicos específicos por parte de la persona a cargo del levantamiento topográfico. Esta facilidad de uso ha propiciado que la fotogrametría pueda ser utilizada por mucha más gente, sin embargo, hacer levantamientos con esta técnica implica llevar a cabo varios pasos en los que hay que tener en cuenta un gran número variables y condicionantes que, si no son convenientemente abordados, van a afectar negativamente a la calidad y exactitud de

los resultados finales. Por eso hay que ser muy riguroso en su aplicación y es necesario acompañar estas topografías con un análisis detallado del procedimiento seguido y del grado de error final (James et al., 2019).

En caso de ser bien ejecutada, esta técnica de levantamiento ofrece grandes ventajas frente al láser escáner (**Fig. 29**): una mayor resolución y exactitud, evitar zonas de sombra o un coste inferior, entre otros (Zapico et al., 2020). Su principal desventaja es que no funciona bien cuando la vegetación es muy densa, ya que esta no puede diferenciarse claramente del suelo, dificultando así el estudio de los procesos erosivos y sedimentarios. Esto cobra mayor importancia en zonas restauradas donde, si la restauración funciona correctamente, la vegetación irá creciendo y siendo más importante con el paso de los años. En estos casos solo se podría usar esta técnica en aquellas zonas no cubiertas por vegetación y con procesos erosivos activos (Zapico et al., 2018).

Es importante resaltar que cualquier cálculo volumétrico basado en la comparación de dos topografías, independientemente del instrumento/técnica de levantamiento empleado, tiene que estar respaldado por un análisis de incertidumbre basado en la combinación de los errores de cada topografía. Normalmente suelen existir problemas conceptuales a la hora de definir el error de una topografía, y por ello a continuación se hace una breve aclaración de términos.

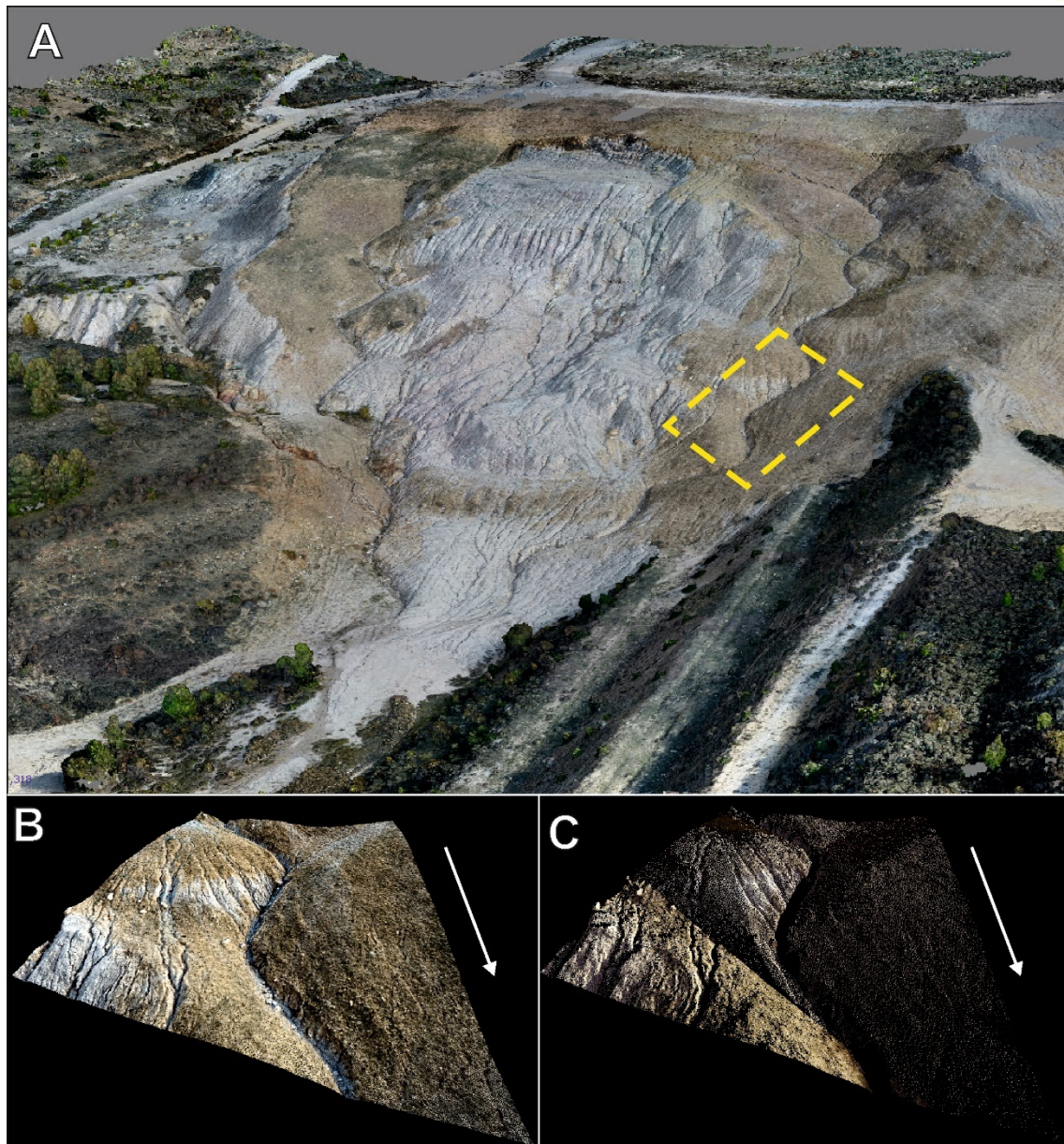


Figura 29. Vistas de nubes de puntos obtenidas en un proyecto de restauración geomorfológica en 2017. (A) Vista general de una nube de puntos obtenida con la técnica fotogramétrica SfM y fotos tomadas con dron; (B) detalle de esa misma topografía; (C) detalle de la misma zona, pero de otra nube de puntos tomada a la vez con láser escáner. Figura extraída de (Zapico et al., 2020).

Una topografía es una representación simplificada de la realidad y, por tanto, va a tener un error. Normalmente en topografía este error se conoce como **exactitud** (*accuracy*), es decir, cuánto se parece la topografía a la realidad, y es característico de cada levantamiento. Se obtiene al comparar una topografía realizada/medida con una técnica específica con otra obtenida a la vez, pero con un aparato/metodología más exacto. La comparación se puede hacer para toda la superficie o para zonas concretas, como

pueden ser puntos específicos marcados en campo. En caso de hacer esta comparación con topografías que no se obtuvieron a la vez, solo hay que hacer esta comparación en aquellas zonas donde se sabe que no se ha producido ningún cambio con el tiempo, es decir, que hayan permanecido estables y sin variaciones en elevación. No hay que confundir exactitud con **precisión** de un aparato/técnica topográfica. Este término hace referencia a cuánto se parecen entre sí varias medidas consecutivas de un mismo objeto/elemento hechas por un mismo aparato/técnica (Schaefer and Pearson, 2021); por ejemplo, si se mide un punto varias veces seguidas con un GPS, cuánto se parecen entre sí esas medidas, va a determinar cuánto de preciso es ese GPS.

Cuando se quieren evaluar procesos erosivos y sedimentarios de una restauración mediante cálculos volumétricos obtenidos de topografías, hay que tener en cuenta además que estas superficies suelen experimentar procesos de asentamiento del terreno que suponen cambios de elevación en el terreno. Estas variaciones no se deben a procesos erosivos ni sedimentarios y, si no se evalúan correctamente, se pueden asignar erróneamente a estos (Zapico et al., 2018).

Recientemente en contextos mineros se está extendiendo la filosofía de la restauración geomorfológica, estabilizar superficies con formas naturales, a los frentes de explotación. En estas zonas lo que se quiere es eliminar las inestabilidades en forma de grietas para evitar futuras caídas o deslizamientos de rocas o arenas. El resultado final es una superficie irregular donde cada tipo de material del frente está adaptado a la forma que le correspondería de forma natural acorde a los procesos formadores del paisaje dominantes localmente. La identificación de inestabilidades donde hay que actuar es crítica y para ello se requieren de topografías de alta resolución y exactitud. Recientemente se ha desarrollado un procedimiento para llevar a cabo este tipo de levantamientos combinando el uso de fotos de dron, fotogrametría y estación total (Zapico et al., 2021a).

5. Conclusiones

Los recursos mineros son básicos para el desarrollo de nuestra sociedad. Sencillamente no podemos llevar a cabo nuestro estilo de vida sin ellos. Es más, actualmente la demanda de recursos mineros metálicos está siendo incrementada por el auge de las tecnologías de energía renovable, dado que, para su desarrollo, se necesitan decenas de estos elementos. Por otra parte, el impacto ambiental de las actividades extractivas es evidente y destaca a primera vista por el drástico cambio que sufre el paisaje. Además, en caso de no tomar las medidas oportunas, el deterioro ambiental no solo se circunscribe al área donde se produce el movimiento de tierras; también se puede extender hacia otros paisajes circundantes, por ejemplo, debido a vertidos que lleguen a un curso fluvial aguas abajo. Todo ello crea un difícil marco de interdependencia entre el estilo de vida de la sociedad actual, la industria minera y la conservación del medioambiente, que precisa de un grado de armonización mediante el empleo de las mejores técnicas, procedimientos y medidas disponibles, así como de su continuo desarrollo y mejora.

En este documento se recogen las principales medidas técnicas a llevar a cabo para controlar y recuperar paisajes afectados por movimiento de tierras de actividades extractivas, en lugares donde la erosión de materiales finos es el principal problema ambiental, como sucede en la zona minera de caolín en el entorno del Parque Alto Tajo. En este entorno es donde se han llevado a cabo la mayoría de las investigaciones que respaldan todo lo descrito en este documento. Estas medidas se pueden resumir en seis puntos:

- i) no puede realizarse una correcta evaluación sobre el impacto hidrológico y sedimentario de una explotación sujeta a movimiento de tierras si previamente no se han definido unos niveles de referencia naturales específicos para los parámetros afectados y la zona de estudio. Dichos

niveles se tienen que basar en la toma de muestras en campo con una alta resolución temporal durante al menos dos años;

- ii) una explotación solo puede controlar los sedimentos producidos por procesos erosivos mediante un sistema de balsas de sedimentación con mantenimiento continuo;
- iii) una superficie donde se desarrolla una actividad extractiva, como es la minería, tiene unas dinámicas hidrológicas y sedimentarias muy complejas y su monitorización solo se puede hacer mediante la instalación de estaciones automáticas de alta resolución temporal equipadas con distintos sensores;
- iv) un proyecto de restauración estable y exitoso con el paso del tiempo tiene que estar fundamentado en la introducción de elementos geomorfológicos tales como: una red de drenaje tridimensional con canales cóncavos, y laderas, lomas y vaguadas complejas con perfiles convexo-cóncavos. Estos elementos van a conformar una topografía estable capaz de controlar las escorrentías superficiales, tal y como lo hacen los paisajes naturales, y ser así, la base sobre la que se desarrollen el resto de las fases de la restauración ecológica (reposición de suelos y revegetación, principalmente);
- v) en caso de tener que hacer restauraciones en terrazas, existe una batería de medidas encaminadas a mejorar su desempeño hidrológico y sedimentario que aumentarán su estabilidad en el medio-largo plazo. Por ejemplo: construir taludes con pendientes suaves, hacer las bermas con contrapendiente o evitar entradas de agua al sistema de taludes desde cotas superiores;
- vi) independientemente del método de restauración empleado, es necesario monitorizar estas superficies para ver si los objetivos de estabilización se han conseguido.

Todos los procedimientos y recomendaciones descritos en este documento están avalados por dos elementos principalmente: i) los estudios que respaldan su uso han sido publicados en revistas de investigación internacionales de gran prestigio y sometidos a evaluación por pares; ii) a pesar de ser medidas surgidas del ámbito de investigación, han sido testadas y siguen funcionando en casos reales de varias explotaciones mineras, principalmente en la zona minera del Alto Tajo. Es decir, son medidas reales que se pueden ver y evaluar, y no meros planteamientos teóricos sin desarrollo práctico.

6. Bibliografía

- Albert, E.K., Phelps, L.B., Conrad, P., 1988. Sedimentation ponds: A review of United States regulations affecting design. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* 2, 7–17.
<https://doi.org/10.1080/09208118808944131>
- Bilotta, G.S., Brazier, R.E., 2008. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Res* 42, 2849–2861.
<https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2008.03.018>
- Bilotta, G.S., Krueger, T., Brazier, R.E., Butler, P., Freer, J., Hawkins, J.M.B., Haygarth, P.M., Macleod, C.J.A., Quinton, J.N., 2010. Assessing catchment-scale erosion and yields of suspended solids from improved temperate grassland. *Journal of Environmental Monitoring* 12, 731. <https://doi.org/10.1039/b921584k>
- Bugosh, N., Epp, E., 2019. Evaluating sediment production from native and fluvial geomorphic-reclamation watersheds at La Plata Mine. *Catena (Amst)* 174, 383–398. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2018.10.048>
- Carrivick, J.L., Smith, M.W., Quincey, D.J., 2016. New analytical methods in earth and environmental science: Structure from Motion in the geosciences.
- Chalov, S.R., 2014. Effects of placer mining on suspended sediment budget: case study of north of Russia's Kamchatka Peninsula. *Hydrological Sciences Journal* 59, 1081–1094. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.903330>
- Fleisher, K.R., Hufford, K.M., 2020. Assessing habitat heterogeneity and vegetation outcomes of geomorphic and traditional linear-slope methods in post-mine reclamation. *J Environ Manage* 255, 109854.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.109854>
- Garbarino, E., Orveillon, G., Saveyn, H., Barthe, P., Eder, P., 2018. Best Available Techniques (BAT) reference document for the management of waste from extractive industries in accordance with directive 2006/21/EC. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
https://doi.org/https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1915_121_Howard
- GCD, 2018. Geomorphic Change Detection Software, Version 7.1.1.0 [WWW Document]. URL <http://gcd.riverscapes.xyz/> (accessed 9.1.18).
- Grove, M.K., Bilotta, G.S., Woockman, R.R., Schwartz, J.S., 2015. Suspended sediment regimes in contrasting reference-condition freshwater ecosystems: Implications for water quality guidelines and management. *Science of The Total Environment* 502, 481–492. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.09.054>
- Howard, E., Loch, R., 2019. Acceptable erosion rates for mine waste landform rehabilitation modelling in the Pilbara, Western Australia, in: Fourie, A., Tibbett, M. (Eds.), *Proceedings of the 13th International Conference on Mine Closure*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 1545–1560.
- James, M.R., Chandler, J.H., Eltner, A., Fraser, C., Miller, P.E., Mills, J.P., Noble, T., Robson, S., Lane, S.N., 2019. Guidelines on the use of structure-from-motion

- photogrammetry in geomorphic research. *Earth Surf Process Landf* 44, 2081–2084. <https://doi.org/10.1002/esp.4637>
- Martin Duque, J., Tejedor, M., Martin-Moreno, C., Nicolau, J., Zapico, I., 2019. Geomorphic rehabilitation in Europe: recognition as best available technology and its role in LIFE projects, in: Fourie, A., Tibbett, M. (Eds.), *Proceedings of the 13th International Conference on Mine Closure*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 133–146.
- Martín Duque, J.F., Tejedor, M., Martín Moreno, C., Nicolau, J.M., Sanz Santos, M.A., Sánchez Donoso, R., Gómez Díaz, J.M., 2020. Geomorphic landscape design integrated with progressive mine restoration in clay quarries of Catalonia. *Int J Min Reclam Environ* 1–22. <https://doi.org/10.1080/17480930.2020.1844368>
- Martín Duque, J.F., Zapico, I., Bugosh, N., Tejedor, M., Delgado, F., Martín-Moreno, C., Nicolau, J.M., 2021. A Somolinos quarry land stewardship history: From ancient and recent land degradation to sensitive geomorphic-ecological restoration and its monitoring. *Ecol Eng* 170, 106359. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2021.106359>
- Martín-Moreno, C., 2013. Quantification of sediment production from the mining area of the Upper Tagus Natural Park. Complutense University.
- Martín-Moreno, C., Fidalgo Hijano, C., Martín Duque, J.F., González Martín, J.A., Zapico Alonso, I., Laronne, J.B., 2014. The Ribagorda sand gully (east-central Spain): Sediment yield and human-induced origin. *Geomorphology* 224, 122–138. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.013>
- Martín-Moreno, C., Martín Duque, J.F., Nicolau Ibarra, J.M., Hernando Rodríguez, N., Sanz Santos, M.Á., Sánchez Castillo, L., 2016. Effects of Topography and Surface Soil Cover on Erosion for Mining Reclamation: The Experimental Spoil Heap at El Machorro Mine (Central Spain). *Land Degrad Dev* 27, 145–159. <https://doi.org/10.1002/ldr.2232>
- Martín-Moreno, C., Martín Duque, J.F., Nicolau Ibarra, J.M., Muñoz-Martín, A., Zapico, I., 2018. Waste dump erosional landform stability – a critical issue for mountain mining. *Earth Surf Process Landf* 43, 1431–1450. <https://doi.org/10.1002/esp.4327>
- Messina, A.M., Biggs, T.W., 2016. Contributions of human activities to suspended sediment yield during storm events from a small, steep, tropical watershed. *J Hydrol (Amst)* 538, 726–742. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2016.03.053>
- Mola, I., Sopeña, A., de Torre, R. (Eds.), 2018. *Guía Práctica de Restauración Ecológica*. Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica, Madrid.
- Pietroń, J., Chalov, S.R., Chalova, A.S., Alekseenko, A. V., Jarsjö, J., 2017. Extreme spatial variability in riverine sediment load inputs due to soil loss in surface mining areas of the Lake Baikal basin. *Catena (Amst)* 152, 82–93. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2017.01.008>

- Schaefer, M., Pearson, A., 2021. Accuracy and precision of GNSS in the field, in: GPS and GNSS Technology in Geosciences. Elsevier, pp. 393–414. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818617-6.00002-0>
- Vidal-Macua, J.J., Nicolau, J.M., Vicente, E., Moreno-de las Heras, M., 2020. Assessing vegetation recovery in reclaimed opencast mines of the Teruel coalfield (Spain) using Landsat time series and boosted regression trees. *Science of The Total Environment* 717, 137250. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.137250>
- Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E., Sear, D.A., 2010. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surf Process Landf* 35, 136–156. <https://doi.org/10.1002/esp.1886>
- Zapico Alonso, I., 2017. Transporte de sedimentos y restauración geomorfológica en la zona minera del Parque Natural del Alto Tajo (Guadalajara, España). Universidad Complutense de Madrid. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15445.70884>
- Zapico, I., 2022. Procedimiento de detección de contaminación por exceso de emisión de sedimentos a la red fluvial en zonas mineras. ES2847259.
- Zapico, I., Laronne, J.B., Castillo, L.S., Duque, J.F.M., 2021a. Improvement of Workflow for Topographic Surveys in Long Highwalls of Open Pit Mines with an Unmanned Aerial Vehicle and Structure from Motion. *Remote Sens (Basel)* 13, 3353. <https://doi.org/10.3390/RS13173353>
- Zapico, I., Laronne, J.B., Meixide, C., Sánchez Castillo, L., Martín Duque, J.F., 2021b. Evaluation of sedimentation pond performance for a cleaner water production from an open pit mine at the edge of the Alto Tajo Natural Park. *J Clean Prod* 280, 124408. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124408>
- Zapico, I., Laronne, J.B., Sánchez Castillo, L., Martín Duque, J.F., 2021c. Drainage network evolution and reconstruction in an open pit kaolin mine at the edge of the Alto Tajo natural Park. *Catena (Amst)* 204, 105392. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105392>
- Zapico, I., Martín Duque, J.F., Bugosh, N., Laronne, J.B., Ortega, A., Molina, A., Martín-Moreno, C., Nicolau, J.M., Sánchez Castillo, L., 2018. Geomorphic reclamation for reestablishment of landform stability at a watershed scale in mined sites: The Alto Tajo Natural Park, Spain. *Ecol Eng* 111, 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.11.011>
- Zapico, I., Molina, A., Laronne, J.B., Sánchez Castillo, L., Martín Duque, J.F., 2020. Stabilization by geomorphic reclamation of a rotational landslide in an abandoned mine next to the Alto Tajo Natural Park. *Eng Geol* 264, 105321. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2019.105321>
- Zapico, Ignacio., Laronne, J.B., Martín-Moreno, C., Martín-Duque, J.F., Ortega, A., Sánchez-Castillo, L., 2017. Baseline to evaluate off-site suspended sediment-related mining effects in the Alto Tajo Natural Park, Spain. *Land Degrad Dev* 28, 232–242. <https://doi.org/10.1002/ldr.2605>



Ignacio Zapico Alonso

Licenciado en Ciencias Ambientales (2009), Máster en Restauración de Ecosistemas (2011) y Doctor en Geología (2017). Mi formación como investigador la realicé con dos de las becas competitivas más importantes en España, una del CSIC, dentro del programa Junta de Ampliación de Estudios para estudios predoctorales, y otra del Ministerio de Ciencia e Innovación del programa posdoctoral Torres Quevedo (1º en el área de Ciencias de la Tierra). He realizado estancias de investigación en la Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile), la Universidad de Aberystwyth (Reino Unido) y la Universidad de Ben-Gurion (Israel).

Desde 2021 soy Profesor Ayudante Doctor especialista en Geomorfología, Restauración Geomorfológica y técnicas y análisis topográficos del paisaje en la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM. Mi docencia e investigación está orientada a recuperar e integrar morfológicamente áreas afectadas por actividades de movimiento de tierras (minería, ingeniería civil y urbanismo), así como a monitorizar su estabilidad y la calidad de sus vertidos.

Soy inventor único de una patente para detectar contaminación fluvial por vertidos mineros en zonas altamente erosivas que ya está en funcionamiento en dos emplazamientos de una empresa. He publicado 12 artículos de investigación en revistas internacionales de alto impacto tales como *Geomorphology*, *Engineering Geology* o *Journal of Cleaner Production*, siendo primer autor en 7. Con regularidad reviso artículos de investigación para revistas SCI como CATENA o ESPL.

También soy investigador en proyectos de I+D+i financiados tanto en convocatorias competitivas de administraciones públicas, como en proyectos suscritos con empresas en el ámbito de transferencia regulados por el artículo 83. En esta última modalidad de contrato he participado en 8 desde 2021. En 3 soy Investigador Principal.

Mi labor de compatibilizar la extracción de recursos minerales con la conservación del medioambiente mediante técnicas de restauración ecológica con base geomorfológica y de control de vertidos, ha recibido varios premios nacionales, siendo los más importantes: el II premio de Minería y Metalurgia Sostenible otorgado por la CONFEDERACIÓN en 2015; y el premio Potencia de Maquinaria de OP e Ingeniería Civil 2020. Categoría: mejor Acción Minera.