



13. Bloque temático

Restauración geomorfológica

José Francisco Martín Duque¹

¹ Universidad Complutense de Madrid.

1. Ámbito y contexto

1.1. Terminología

El vocabulario relativo a la recuperación de espacios degradados, desde una aproximación geomorfológica, ha estado condicionado por el término asociado a la minería, al haber sido este su mayor ámbito de aplicación. En Estados Unidos y Canadá se habla de *mine reclamation* y de *geomorphic reclamation* (OSMRE, 2022). En otros entornos geográficos, como Australia, es más común el uso de *mine rehabilitation* (y *geomorphic rehabilitation*). En España, el Real Decreto 975/2009 requiere la «rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras».

Reclamation o *rehabilitation*, y no *restoration*, suponen, implícitamente, una limitación para restituir ecosistemas y paisajes que han sido severamente alterados. Sin embargo, aquí nos hemos decantado por *restauración geomorfológica* (en adelante, RG), pues interpretamos que, cuando se usa una aproximación geomorfológica en la recuperación de terrenos degradados, sí es posible optar por el objetivo más ambicioso, como es restaurar sistemas que se aproximan a los naturales en su configuración y dinámica. En este contexto, la RG es una parte de la restauración ecológica, dirigida a reparar, con el mejor conocimiento y técnicas disponibles, el medio físico de ecosistemas que han sido dañados por movimientos de tierras. También es común *landform design*, sobre todo en Australia o Canadá (LDI, 2022). Pero bajo este concepto no queda claro que la topografía que se diseñe trate necesariamente de replicar la natural. Para evitar esa confusión, algunos utilizan *geomorphic landform design* (DePriest *et al.*, 2015).

1.2. Breve historia de la restauración geomorfológica

La RG agrupa toda una serie de normativas, principios, conocimientos, métodos y técnicas que comienzan a ser descritos en 1977. Casualmente, ese mismo año, dos documentos muy distintos introducen este enfoque. Por un lado, la ley que regulaba las restauraciones mineras en Estados Unidos (SMCRA, 1977) comenzó a establecer que la configuración superficial alcanzada por el retrolleado y remodelado de las zonas mineras debía parecerse a la configuración general de la superficie antes de dicha actividad, y «debía integrarse con, y complementar, la red de drenaje del terreno circundante». Por otro lado, una nota publicada en la revista *Rock Products* (Humphries, 1977) propuso un método para realizar voladuras selectivas en canteras del Reino Unido, de modo que se crearan geoformas (*landforms*) similares a las encontradas en los paisajes naturales del entorno. Esta idea se desarrolló luego en Humphries (1979).



➤ **Figura 1.** Apertura de una explotación minera en Australia occidental. Al fondo puede intuirse el bosque original, sobre una gran llanura (1) salpicada por pequeños relieves residuales (2). En el centro (3) se observa la retirada del suelo; (4) muestra el inicio de construcción una escombrera exterior. A la derecha (5) pueden observarse las primeras fases de excavación de la corta o hueco minero (pit). Es en contextos como este donde la RG es necesaria, para integrar funcional y visualmente en su entorno todo el espacio transformado. **Autor:** J.F. Martín.

Tras esos antecedentes, el primer trabajo que refiere explícitamente la incorporación de principios geomorfológicos en la recuperación de espacios degradados es Stiller, Zimpfer y Bishop (1980), referencia bibliográfica pionera, de base científica, sobre RG. También fue vanguardia el libro de Hannan (1984), verdadero manual sobre remodelados geomorfológicos. En 1987, Toy y Hadley publican un libro titulado *Geomorphology and Reclamation of Disturbed Lands*. Y ya en la década de los noventa del siglo XX, la literatura sobre RG empieza a ser relativamente común: Riley (1995), Sawatsky y Beckstead (1996) o *Landform Design for Rehabilitation* (Environment Australia, 1998), manual que actualizó el trabajo de Hannan (1984). España cuenta con artículos pioneros en RG en esa década (Martín Duque *et al.*, 1998). A partir del año 2000 y hasta la fecha, tiene lugar un desarrollo extraordinario de la bibliografía referida a la RG, de nuevo con una buena aportación desde España (Toy y Black, 2000; Bugosh, 2000; Sawatsky *et al.*,

2000; Sawatsky, Beersing y Ade, 2008; Nicolau, 2003a, 2003b; Toy y Chuse, 2005; Bugosh y Eckels, 2006; Martín Duque *et al.*, 2010, 2020, 2021; DePriest *et al.*, 2015; Martín Moreno *et al.*, 2018; Zapico *et al.*, 2018, 2020, 2021; Hancock, Martín Duque y Willgoose, 2019; Bugosh y Epp, 2019; Bugosh y Eckels, 2022).

1.3. ¿Dónde y por qué es necesaria la RG?

La reconstrucción de nuevas geoformas y paisajes es necesaria allí donde estos han sido transformados o destruidos, lo cual ocurre, sobre todo, por actividades humanas que «mueven tierras» (minería, ingeniería civil o urbanismo). A diferencia de otras perturbaciones, el movimiento de tierras provoca transformaciones inexorables, de modo que todos los componentes de los ecosistemas y los paisajes son dañados (**figura 1**). Es decir, no sólo la vegetación o el suelo, sino

también la topografía, el sustrato, la hidrografía y la hidrogeología (Gómez Sal y Nicolau, 1999).

La completa eliminación de la vegetación y del suelo desencadenan procesos erosivos severos, que generan impactos ambientales aguas abajo, mediante emisiones contaminantes, normalmente cargadas de sedimentos (contaminación física), pero también química, como en el caso de la minería metálica, con el drenaje ácido de mina (DAM). A su vez, las transformaciones que provocan las excavaciones de terrenos o las acumulaciones de tierras generan condiciones muy elevadas de inestabilidad, lo que implica un grave riesgo de subsidencias, deslizamientos o colapsos (Mossa y James, 2021). Uno de los efectos más críticos del movimiento de tierras es la destrucción de las redes de drenaje (Kite *et al.*, 2020).

La RG surge por la letanía de fallos (sobre todo inestabilidad por erosión) documentados en Estados Unidos en la década de 1990, asociados a los métodos de reconstrucción topográfica convencionales (laderas rectas de pendiente homogénea, taludes y bermas, terrazas). También ante la imposibilidad de estas aproximaciones, que son combinación de la ingeniería civil y de prácticas agrícolas ancestrales, para garantizar la estabilidad de los espacios rehabilitados ante eventos extremos, y por su escasísima integración visual y ecológica. Martín Duque *et al.* (2010) realizan una recopilación detallada de referencias bibliográficas al respecto.

1.4. Un intento de definición

No existe una definición clara de RG. Sobre todo, porque normalmente se ha referido a un tipo de actividad (minería) y a un enfoque (geomorfología fluvial). Una descripción conocida es la siguiente (OSMRE, 2022):

«Debido a los actuales avances en tecnología, es posible diseñar de forma rápida y económica geoformas y cauces estables que imitan la apariencia y funcionalidad de la naturaleza. Usando modernas herramientas de diseño y la aproximación de restauración geomorfológica, es posible recuperar terrenos altamente degradados y crear sistemas naturales totalmente funcionales, virtualmente indistinguibles de los paisajes circundantes».

Sawatsky y Beckstead (1996: 127) detallan la aproximación geomorfológica para la recuperación de zonas mineras, consistente en «diseñar sistemas de drenaje, geoformas y paisajes que repliquen los naturales, lo que reduce el riesgo de erosión acelerada [...]», lo que requiere una comprensión de la geomorfología regional. Para Toy y Chuse (2005), una aproximación geomorfológica a la reconstrucción topográfica busca la «restitución de cuencas hidrográficas, laderas y cauces con paisajes en equilibrio dinámico, de modo que los ajustes debidos a procesos geomorfológicos disminuyan después de la restauración».

Ante la falta de una definición amplia, intentamos aquí una enunciación más general, con el espíritu de que esta se vaya revisando, matizando y completando. Tratando de aunar todos los contextos y enfoques, la RG podría definirse como:

«El proceso de diseñar, construir o reconstruir geoformas y paisajes, y arquitecturas de sustratos, que repliquen la morfología y dinámica de las naturales, allí donde el terreno ha sido severamente transformado y degradado por actividades humanas que mueven tierras, tales como minería, obra civil o urbanización; tanto en sus resultados de excavación (desmontes, cortas, etc.) como de relleno (escombreras, vertederos, terraplenes)».

Según nuestro enfoque, la RG no es una mera reconstrucción topográfica, pues aborda también el restablecimiento de la estructura o arquitectura natural del terreno, incluyendo sus formaciones superficiales y suelos. A su vez, no implica necesariamente la reconstrucción de redes de drenaje o cuencas hidrográficas, sino que sería aplicable, literalmente, a cualquier geoforma «natural» de la superficie terrestre.

Si se nos permite el símil prestado de la ciencia ficción, sólo los medios técnicos y económicos impedirían «construir un fiordo», puesto que existen la tecnología y el conocimiento para que este sea diseñado por ordenador. Por esta tarea fue premiado Slartibartfast: «Mírame: diseño líneas de costa. Conseguí un premio por Noruega. [...] He estado diseñando fiordos toda mi vida. [...] Hubo un momento fugaz en que estuvieron de moda y conseguí un premio por ello» (Slartibarfast, Diseñador de Planetas, *Guía del Autoestopista Galáctico*, Adams, 1979: cap. 30).

2. Métodos de restauración geomorfológica

Existen muchos ejemplos de restauración que han incluido principios geomorfológicos. Por ejemplo, la construcción de laderas cóncavas (Martín Duque *et al.*, 1998, 2010; Martín Moreno *et al.*, 2016; Loch, 2010). Si bien esta idea es interesante, es sólo una solución bidimensional para paisajes que son siempre tridimensionales. También se han construido laderas festoneadas en minería y desarrollos urbanos (Schor y Gray, 2007), pero diseñadas de un modo esquemático e intuitivo. Sin embargo, en esta sección describimos métodos que tienen un procedimiento bien establecido, sistemático, complejo, basado en principios de la ciencia geomorfológica, para tratar de replicar configuraciones terrestres naturales, tridimensionales, a escala de paisaje.

2.1. Métodos de restauración geomorfológica fluvial

La práctica totalidad de la RG ha estado basada en la geomorfología fluvial. Ello es debido a que la mayor parte de los paisajes de la superficie terrestre han sido modelados por la acción fluvial, y los métodos de RG que han tenido mayor de-

sarrollo buscan la réplica de cuencas hidrográficas y redes de drenaje. Pero insistimos en que la RG es un concepto mucho más amplio, al menos a nivel teórico, e incluye cualquier aproximación técnica, de base científica, para replicar relieves y paisajes naturales de cualquier origen y contexto geográfico y climático.

Los métodos de restauración geomorfológica fluvial (en adelante RGF) se nutren de una ingente literatura científica, según la cual geomorfológicos e hidrólogos habían investigado, bien la configuración de cuencas hidrográficas para su comprensión (Horton, 1945; Strahler, 1964), bien la dinámica fluvial con el propósito de replicar esas características en la mejora de sistemas fluviales degradados (Dunne y Leopold, 1978; Williams, 1986; Rosgen, 1994, 1996).

2.1.1. La aproximación geomorfológica (método canadiense)

Cronológicamente, fue el primero en desarrollarse. Este enfoque geomorfológico se introdujo a principios de la década de 1990 en restauraciones mineras del estado de Alberta (Canadá), como respuesta de empresas mineras a exigentes obligaciones normativas y de responsabilidad. Las minas de arenas petrolíferas (*oil sands*) del norte de Alberta requerían —y requieren— en sus planes de cierre garantizar la responsabilidad ante impactos o riesgos derivados de eventos extremos. Las empresas eran reticentes a asumir compromisos a tan largo plazo. Por el contrario, los reguladores tuvieron siempre la preocupación de que los planes de cierre previnieran futuras catástrofes, como las derivadas de la rotura de presas mineras.

Ante esa situación, las aproximaciones convencionales de análisis de riesgo, basadas en eventos catastróficos específicos —que excedieran periodos de retorno superiores a 2.000 años— eran muy costosas. Además, las estructuras de drenaje resultantes ni favorecían la recuperación de los ecosistemas nativos ni se integraban con los mismos. En ese contexto, la alternativa fue la «aproximación geomorfológica», basada en replicar la configuración y dinámica de los sistemas naturales, permitiendo a los promotores demostrar que sus restauraciones se comportarían de modo similar a aquellos, con tasas comparables de erosión y sedimentación, siendo sostenibles en el largo plazo. Los nuevos sistemas de drenaje, «naturales», evitarían así la fea apariencia de los estructurales, proporcionando una elevada integración ecológica y paisajística a un coste significativamente menor. Se argumentaba, además, que los nuevos drenajes basados en los naturales resistirían de un modo mucho más resiliente que los de la ingeniería convencional los efectos de eventos extremos. Es muy interesante destacar que la RG en Canadá fue auspiciada por los promotores mineros como una solución económica, eficiente y ecológica.

El método canadiense requiere de una comprensión profunda de los sistemas fluviales regionales, los cuales trata de replicar con la mayor precisión posible. Se busca reproducir formas del terreno y redes de drenaje análogas a las naturales. Se diferencia entre dos grandes sistemas: laderas y llanuras aluviales.

En las laderas, los paisajes diseñados y construidos se organizan en torno a redes de drenaje con cauces de primer y segundo orden, efímeros, cuyos fondos están colonizados por vegetación (*vegetated waterways*), imitando las zonas más altas y de mayor pendiente de las cuencas hidrográficas naturales (**figura II**). Donde los cauces diseñados reciben volúmenes de escorrentía superiores a sus equivalentes naturales, estos son reforzados con carga de fondo (gravas, cantos y bloques), en un efecto de «armado» (*armored channels*). En el caso de las llanuras aluviales, se replican sistemas fluviales equivalentes, previo estudio de los mismos, en los términos que ya había recogido una inmensa literatura científica. Se cuantifican y replican parámetros como anchura y profundidad de los cauces de *bankfull*, pendiente de los cauces, tipo de secciones, sinuosidad, longitud y anchura de los cinturones de meandros, entre otros.

La aproximación geomorfológica canadiense es muy robusta respecto a la reconstrucción de las redes de drenaje, pero no aborda de un modo integral la reconstrucción de los interfluvios, ni dispone de un *software* (comercial o libre) que permita una transferencia global de este método. Para una introducción al método canadiense de RG recomendamos la lectura de Sawatsky, Beersing y Ade (2008) y Sawatsky y Beersing (2014), desde donde, a su vez, se puede acceder a más referencias.

2.1.2. GeoFluv-Natural Regrade

Los beneficios de desarrollar aproximaciones completas de RG, que integran las redes de drenaje con sus laderas, habían sido propuestos en la literatura del último cuarto del siglo XX (SMCRA, 1977; Hannan, 1984; Sawatsky y Beckstead, 1996; Environment Australia, 1998). Pero hasta la aparición de GeoFluv no existía un método que permitiera realizar diseños con un enfoque geomorfológico integral (cauces y laderas), y mucho menos un *software* (Natural Regrade) que ejecutara esa función en plataformas *computer aided design* (en adelante, CAD) o a partir de modelos digitales de elevaciones (MDE).

Este método surgió porque, veinte años después de las exigencias de SMCRA, en 1997, los reguladores mineros de Estados Unidos constataban que las rehabilitaciones mineras no cumplían las condiciones necesarias para la devolución de avales, depósitos económicos que las empresas deben entregar a las Administraciones como garantía de la restauración. En 1999, la *US Government's Office of Surface Mining* (OSM) informaba de que las minas de carbón sólo cumplían con el 66 % de sus objetivos para recuperar avales, y describía que los problemas asociados a la inestabilidad de las geoformas eran frustrantes (Bugosh y Eckels, 2022). Ese año, la empresa BHP, que operaba varias minas en el ambiente altamente erosivo de Nuevo México, reconociendo los problemas asociados a las prácticas convencionales, comenzó a aplicar un método integral de restauración geomorfológica fluvial, GeoFluv, inventado y patentado por Nicholas Bugosh, quien había sido inspector de restauraciones mineras en el estado de Montana, y había constatado el fracaso



➤ **Figura II.** Cauce efímero, colonizado por vegetación (*vegetated waterway*), construido sobre escombreras mineras de Canadá occidental.

de las aproximaciones convencionales. Este método, desarrollado por primera vez en la mina La Plata, integraba el diseño de las redes de drenaje y sus interfluvios, proporcionando estabilidad erosiva. Las divisorias se articulan como laderas complejas, con perfiles longitudinales convexo-cóncavos, pero en tres dimensiones, es decir, incluyendo lomas secundarias y vaguadas. Estas morfologías, que imitan a las naturales, rompen con la estructura de laderas largas y de pendiente uniforme de los métodos de la ingeniería tradicional, evitando la erosión en regueros y cárcavas. Las vaguadas reciben la escorrentía de las laderas y la ceden a los cauces de modo no erosivo. El conjunto está drenado por cauces fluviales diseñados (a partir de modelación hidrológica) para transportar de modo no erosivo la escorrentía y el sedimento, entregándolo a su nivel de base de modo estable, en un equilibrio dinámico similar al que tienen los paisajes geomorfológicamente maduros (véase la **figura III**). Las secciones transversales, los perfiles longitudinales y las configuraciones en planta de los cauces diseñados, y sus relaciones matemáticas (Williams, 1986), también replican los naturales.

Los beneficios pronto se hicieron evidentes. No sólo se garantizaba la estabilidad ante la erosión, sino que se proporcionaba una gran biodiversidad, una mayor capacidad de almacenar agua en el suelo en un ambiente semiárido y una extraordinaria integración visual. También una reducción de los costes de mantenimiento, lo que promovía una mayor rapidez y garantía de recuperación de avales. Estas ventajas fueron presentadas por primera vez en un *workshop* (Bugosh, 2000) cuya denominación no puede ser más expresiva: *Alternatives to Gradient Terraces*. La empresa BHP obtuvo varios premios por la restauración de La Plata. El método fue luego usado en otra explotación cercana, en 2002, San Juan, que recibió el premio a la mejor restauración minera (*Best of the Best*) en 2004, a nivel federal. El método fue finalmente implementado en 2005 en el *software* comercial Natural Regrade, de la compañía Carlson. Para más información, véanse: Bugosh y Eckels (2006); Bugosh y Epp (2019, 2022); Zapico *et al.* (2018, 2020, 2021); Hancock, Martín Duque y Willgoose (2019); Martín Duque *et al.* (2020, 2021); Carlson (2022).

Se puede afirmar, con las evidencias descritas y proporcionadas por la bibliografía, que GeoFluv, a través del *software* Natural Regrade, es el método más completo de RG, pues permite diseños integrales de paisajes a escala de cuenca hidrográfica, utilizando principios proporcionados por las ciencias hidrológicas y geomorfológicas. También es el método de RG más utilizado a nivel mundial. En torno al mismo, toda una serie de empresas de Estados Unidos (GeoFluv, 2022), Australia (Landforma, 2022), Suecia (VAST, 2022) y Sudáfrica (Mining Resource Consultancy, 2022) y un grupo universitario de España (Restauración Geomorfológica, 2022) están desarrollando su uso a nivel mundial (véanse las figuras IV, V y VI).

2.1.3. Método australiano. Sistema híbrido geomorfología-ingeniería

Como ya se comentó, en Australia hubo un desarrollo pionero de literatura sobre restauración geomorfológica (Hannan, 1984; Environment Australia, 1998). Sin embargo, no fue hasta la década de 2010 cuando hubo un desarrollo efectivo, con diseños y ejemplos reales. Ello ocurrió a partir de la introducción en este país de GeoFluv-Natural Regrade por parte de Rod Eckels (Landforma), topógrafo que había guiado la construcción de RG en La Plata (Estados Unidos). A partir de ahí, el proceso ha estado liderado por el ingeniero civil Chris Waygood (Waygood, 2014; Kelder y Waygood, 2016), quien, tras su experiencia con GeoFluv-Natural Regrade, ha desarrollado un método propio, junto con otros colaboradores (Sven Drexler). Este método está basado en principios geomorfológicos y de la ingeniería civil, y supone una simplificación de las formas, lo que permite una mayor facilidad de construcción con gran maquinaria. También introduce el uso de modelación hidrológica compleja para evaluar el riesgo erosivo de cauces, sobre la base de la ecuación de transporte fluvial de Einstein-Brown. Cuando se estima que el riesgo es elevado, los cauces se refuerzan con un armado de rocas (figura VII). El éxito de esta aproximación está siendo tal que la práctica totalidad de las operaciones de minería de carbón de Hunter Valley (Nueva Gales del Sur) están adoptando ya este método, que se incorpora como restauración progresiva en las operaciones mineras (figura VII).

2.1.4. Restauración de cauces naturales

La restauración de ríos desde una óptica geomorfológica constituye un ámbito muy complejo, aplicable a distintos tipos y grados de perturbación de los sistemas fluviales. Por ello queda fuera del ámbito de este capítulo. En todo caso, hacemos aquí una breve mención al hecho de que: i) hay varias iniciativas conjuntas sobre restauración geomorfológica y de cauces naturales en minería (Vories y Caswell, 2009); y ii) existe un *software* específico, RiverMorph (RiverMorph, 2022), que permite mostrar y editar secciones transversales de cauces basadas en las relaciones morfológicas establecidas por Rosgen (1994, 1996).



➤ **Figura III.** Formas del terreno y paisajes convergentes en diferentes regiones del Planeta. Imagen superior, Hunter Valley (Nueva Gales del Sur, Australia). Imagen central, Puerto Libertador (Colombia). Imagen inferior, recreación de un paisaje del interior de la provincia de Lugo (España), por el ilustrador Miguelanxo Prado. Los tres casos muestran relieves alomados, con una sucesión contrapeada de lomas y vaguadas a ambos lados del valle, que arrancan desde las inflexiones de las líneas del drenaje natural, con las lomas en el interior de los zigzag del valle y las vaguadas en el exterior. Resulta verdaderamente revelador el hecho de que esta estructura de cauces y laderas no esté descrita en ningún texto de geomorfología. El método GeoFluv-Natural Regrade se basa en: i) analizar este tipo de paisajes (referentes o análogos); ii) medir su morfometría; y iii) replicarla mediante diseños CAD. **Autores:** foto superior: N. Bugosh; foto central: J.F. Martín, imagen inferior: ©Miguelanxo Prado.

2.2. Métodos de RG en macizos rocosos

Muchas perturbaciones del terreno (trincheras de infraestructuras lineales o frentes de explotación minera) afectan a rocas consolidadas, como calizas, granitos o basaltos, que no son susceptibles de ser remodeladas con morfologías suavizadas como las descritas bajo los métodos de RGF. Estas nuevas geoformas de origen antrópico son el resultado de voladuras y desmontes que exponen rocas no meteorizadas, originando un impacto paisajístico elevado. Estos frentes no están sujetos a erosión hídrica, pero sí a movimientos en masa (como caídas y deslizamientos). Dos métodos, desarrollados en el Reino Unido y Francia, han buscado optimizar la estabilidad y la integración ecológica y paisajística de excavaciones humanas en macizos rocosos.

2.2.1. Réplica de escarpes rocosos naturales en el Reino Unido

Ya se comentó que los artículos de Humphries (1977, 1979) se encuentran entre los pioneros a nivel mundial sobre RG. Destinados a replicar laderas y escarpes rocosos en frentes de explotación de canteras, marcaron un camino que fue continuado por el *Limestone Research Group, Manchester Polytechnic* (Gagen y Gunn, 1988; Gunn, Bailey y Gagen, 1992; Gunn y Baley, 1993; Legwaila, Lange y Cripps, 2015). Los trabajos de esta escuela aparecen ilustrados en el conocido libro *The Restoration of Land* (Bradshaw y Chadwick, 1980), con una fotografía en la página 213 cuyo pie recoge «*Large quarry faces need to be shaped to give naturalistic land forms*», inmejorable descripción del objetivo de la RG.

2.2.2. Talud Royal

Desarrollado y registrado por el ingeniero geólogo Paul Royal (Francia), este método permite diseñar y construir taludes rocosos que reproducen acantilados naturales, obteniendo la máxima estabilidad y maximizando la integración visual y ecológica en su entorno, evitando generar los impactos visuales tan traumáticos que supone, casi siempre, la excavación de macizos rocosos. El objetivo es reconstruir escarpes que se adaptan a la estructura geológica y al modo en que se erosionan de forma natural, manteniendo el carácter («alma») del paisaje.

Para obtener tales configuraciones, el método utiliza lo que se denominan «voladuras de destroza», liberando sus planos naturales (diaclasas y/o estratificación). En palabras de Paul Royal, «debe aceptarse la forma en que la roca reacciona a este tipo de voladura». Posteriormente, el uso de retroexcavadoras, e incluso de limpiezas manuales puntuales, acaba por exponer las discontinuidades naturales. De este modo, las geoformas que aparecen en el talud son similares a las que crearía la erosión natural (**figura VIII**).



➤ **Figura IV.** Restauración mediante GeoFluv en la mina La Plata, Nuevo México (Estados Unidos), donde nació el método. Imagen superior, reconstrucción de una gran escombrera minera, con anterioridad al proceso de revegetación. Imagen inferior, otro sector de la escombrera tras dos años desde su semillado, mostrando ya una comunidad vegetal diversa. Ambas imágenes muestran paisajes organizados sobre la estructura que tienen las cuencas hidrográficas naturales, con cauces principales zigzagueantes y meandriiformes, de los que parten una serie de lomas y vaguadas alternas, que configuran laderas festoneadas, de perfiles longitudinales convexo-cóncavos. Esa estructura es idéntica a la de la mayoría de los paisajes de la superficie terrestre (véase la similitud de estos paisajes construidos con los naturales de la **figura III**). **Autor:** E.E. Epp.

Al quedar expuestas las caras rocosas de los planos naturales, la mayoría estarán impregnadas por depósitos de óxidos, debido a la circulación fisural del agua ocurrida durante milenios. Una vez expuestas a la intemperie, estas pátinas adquirirán rápidamente un aspecto muy parecido a las rocas del entorno. Al reconstruir escarpes con mayor complejidad topográfica, las pequeñas depresiones constituirán trampas para materiales finos, permitiendo una colonización vegetal espontánea, acelerada por el aporte de agua procedente de las redes de fracturas preexistentes.

El método del Talud Royal comienza con un diagnóstico geológico, basado en entender la litología, su estructura y el paisaje que se ha formado en el medio

objeto de actuación, de modo natural, a partir de esas rocas y sus fracturas. Una vez caracterizada esa arquitectura, se diseñan y esquematizan las nuevas geometrías, describiendo los tipos de voladura (si procede) y de extracción y tratamiento, que son específicos para cada lugar. El método requiere un seguimiento cuidadoso de las obras y una formación adecuada de todo el personal implicado.

Una descripción del Talud Royal, aplicado sobre todo en carreteras de Francia, pero que está comenzando a aplicarse en minería, puede encontrarse en la web *Genie Geologique* (2022).

3. Arquitectura de materiales y suelos

Aunque ha sido definida como tal (Toy y Chuse, 2005), la RG no tiene por única- mente por objetivo una reconstrucción topográfica. O no es sólo ese proceso. Al igual que las geofomas del terreno no son sólo topografía, sino que tienen una disposición específica de sustratos, formaciones superficiales y suelos, la RG debe proponer soluciones que integren esas estructuras bajo las topografías diseñadas, de modo que se restituyan arquitecturas del medio físico que se asemejen a las naturales.

Martín Duque *et al.* (1998, 2010) y Martín Moreno (2016) describen cómo, ante la ausencia de suelos, el uso de formaciones superficiales (coluviones carbonáticos) constituye una solución eficiente para recuperar ecosistemas locales. El concepto de «formación superficial» (aluviales, coluviales, derrubios, etc.) apenas está interiorizado en el mundo de la restauración ecológica.

Cuando existen materiales potencialmente contaminantes, la combinación de RG con cubiertas evapotranspirativas es una línea de trabajo verdaderamente prometedora (Zhang *et al.*, 2018). Esta solución ha sido propuesta por el grupo de Restauración Geomorfológica de la UCM para el sellado experimental de dos vertederos de residuos sólidos urbanos en Extremadura (Fuentes de León y Zalamanza de la Serena).

4. La RG según el tipo de movimiento de tierras

La RG se ha aplicado sobre todo en minería. Los métodos más utilizados son GeoFluv y la aproximación canadiense, y los países con mayor implantación son Estados Unidos, Canadá, España, Australia y el Reino Unido, con un desarrollo incipiente en Suecia, Portugal, Sudáfrica o Colombia. En el ámbito de las infraestructuras lineales, se ha aplicado casi exclusivamente en Francia, en macizos rocosos (Talud Royal).

Sin embargo, existe todo un universo de aproximaciones, con enorme potencial, sobre «geopaisajismo» (*geolandscaping*). El enfoque geopaisajista —introducción de principios geológicos y geomorfológicos en el diseño de espacios urbanos y zonas verdes— busca aumentar la integración ambiental urbana en su entorno. Aquí cabe distinguir dos grupos. Por un lado, los enfoques próximos a la RGF, como Schor y Gray (2007), buscan reducir las modificaciones topográficas del urbanismo, los impactos asociados y extender su integración en el paisaje. Schor y Gray (2007) defienden que las transformaciones asociadas al espacio edificado preserven o repliquen las formas del terreno subyacentes, y que el hecho de imitar esas formas proporciona soluciones económicas y ecológicas. Por otro lado, hay un verdadero paisajismo geológico, emergente y creciente (véanse Foxley, 2010; o Basha, Eplényi y Sándor, 2021). Basha, Eplényi y Sándor (2021) hablan de «geología inspiradora», que busca entender y comprender la configuración geológica y geomorfológica del entorno y usar dicho entendimien-



to para el diseño de nuevos paisajes, con el fin de incorporar más naturaleza en los ambientes construidos.

5. Indicadores y modelos para cuantificar y predecir el éxito de la RG

5.1. Indicadores

La RG(F) se desarrolló para incrementar la estabilidad ante la erosión, cuya cuantificación (y la de la emisión de sedimentos, *sediment yield*) es necesaria

para medir el éxito de las restauraciones. Aguas abajo, se mide la inmisión de caudales y sedimentos en los cursos fluviales. En todos los casos, el objetivo es aproximarse a los valores del entorno (línea base, *baseline*). Los métodos para medir la erosión del suelo y la escorrentía en RG son los mismos que se utilizan en cualquier otro ámbito, como tierras agrícolas (FAO, 1997).

Al minimizar la escorrentía, se aumenta la infiltración, incrementando la humedad del suelo y el agua disponible para las plantas. Este aspecto es crítico en ambientes áridos, donde dicha disponibilidad es el factor limitante en el éxito de la revegetación. También el incremento de la biodiversidad es un objetivo de la RG. Aquí la literatura es aún muy escasa, pero demuestra con evidencias científicas la mejora de la biodiversidad con la RG (véanse Fleisher y Hufford, 2020; Turrión *et al.*, 2021).

5.2. Procedimientos

5.2.1. Medidas directas

La erosión de espacios restaurados con RG puede calcularse mediante la construcción de pequeños diques (*check dams*), que permiten cuantificar el sedimento total acumulado hasta ese punto. Con la transformación del volumen a masa, por unidad de superficie y tiempo, se obtienen tasas de erosión en $\text{Mg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Bugosh y Epp (2019) describen un experimento en el que demostraron que la RG con GeoFluv en la mina La Plata (Nuevo México, Estados Unidos) ofrecía tasas de erosión menores a las del entorno natural.

Las cuantificaciones volumétricas de cambios topográficos también proporcionan tasas de erosión y sedimentación. Las topografías objeto de comparación pueden obtenerse mediante GPS diferencial, láser escáner terrestre y aéreo (LiDAR, *Light Detection and Ranging*) o a partir de imágenes tomadas con drones y procesadas con software fotogramétrico, basado en la técnica *Structure from Motion* (SfM). En todos esos casos se obtienen nubes de puntos con las que se generan MDE y redes irregulares de triángulos (*triangular irregular networks*, TIN), que se comparan en entornos SIG o CAD. El balance entre dos MDE se conoce como *Difference of Dem* (DoD) y también se puede realizar mediante software especializado, como *Geomorphic Change Detection* (GCD). Australian Government (2016), Martín Moreno *et al.* (2018) y Zapico *et al.* (2018) aportan ejemplos de cuantificaciones volumétricas a partir de cambios topográficos en el contexto de RG y minería.

La medición de la inmisión se refiere tanto a un posible incremento de caudales como de concentración de sólidos en suspensión (en adelante, CSS) (*suspended sediment concentrations*, SSC). La CCS (g l^{-1}) se mide con turbidímetros o botes sifonados. El caudal se calcula con *flumes* y sensores de presión (FAO, 1997). Zapico *et al.* (2017, 2018) describen el uso de estos métodos en el contexto de RG y minería.

La humedad del suelo evalúa el porcentaje de agua en el mismo mediante reflectometría de dominio de tiempo (*time domain reflectometry*, TDR), equivalente a la humedad gravimétrica y al potencial hídrico, que indica con qué fuerza retiene el suelo el agua y, por tanto, cuánto les cuesta a las plantas absorber el agua del suelo. Esta medida tiene mayor sentido ecológico que la humedad.

5.2.2. Modelos predictivos

Los modelos de erosión más conocidos (por ejemplo, RUSLE, WEPP, etc.) no son adecuados para evaluar la estabilidad de la RG, pues predicen la pérdida de suelo a escala de ladera, mientras que en el contexto de la RG estamos siempre a escala de cuenca hidrográfica o paisaje. Las herramientas verdaderamente adecuadas para estimar la estabilidad de la RG son los modelos de evolución del paisaje (*landscape evolution models* [en adelante, LEM]), como SIBERIA o CAESAR-Lisflood. Los LEM predicen las tasas de erosión ($\text{Mg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) o de reba-



➤ **Figura VI.** Ejemplo de aplicación de GeoFluv en Suecia. La empresa VAST está desarrollando la RG en Escandinavia en ecosistemas muy sensibles (*tundra*). Desde 2020, ha realizado diseños para las minas Kiruna, Svappavaara y Malmberget, de LKAB. También para Copperstone, en la mina Viscaria, primer proyecto de Escandinavia que incluye un diseño de RG durante la fase de obtención de permisos. La imagen muestra el primer proyecto construido, demostrativo, de RG en esa región (mina Svappavaara). El diseño fue adaptado a un depósito existente de residuos mineros, para minimizar el movimiento de tierra y los costes. A su vez, se integró con un canal perimetral de drenaje para recoger la escorrentía y dirigirla a balsas de decantación, antes de conectar con las redes de drenaje naturales. Con ello, se demuestra la posibilidad de adaptar este tipo de soluciones a operaciones activas. **Autor:** VAST.

jamiento (mm a^{-1}), su tipo (regueros, cárcavas, barrancos, etc.) y dónde ocurrirá. Además, permiten visualizar cómo evoluciona el paisaje tras los procesos de erosión y sedimentación.

Hancock *et al.* (2010) usaron SIBERIA y CAESAR-Lisflood para estudiar la evolución de formas del terreno propuestas para rehabilitaciones mineras del norte de Australia. Hancock, Martín Duque y Willgoose (2019) explican el uso de SIBERIA para evaluar la estabilidad de distintos diseños GeoFluv y convencionales, permitiendo elegir el más estable. Slingerland, Zhang y Beier (2022) evaluaron la estabilidad de cuatro diseños (dos convencionales y dos geomorfológicos) de un

cierre de una balsa minera mediante CAESAR-Lisflood, concluyendo que uno de los diseños geomorfológicos mostraba la mayor estabilidad ante la erosión en el largo plazo.

También tienen utilidad los modelos que posibilitan conocer el poder erosivo de flujos concentrados (como Iber [2022]). La herramienta de modelización Iber (Bladé, Cea y Corestein, 2014a; Bladé *et al.*, 2014b), empleada hasta ahora para la simulación de procesos fluviales, se está comenzando a utilizar para evaluar el comportamiento hidrológico-hidráulico de las líneas de drenaje diseñadas con GeoFluv.

6. Evaluación de la RG

6.1. Ventajas

Los métodos de RG (RGF) surgieron para conseguir una mayor estabilidad que permitiera recuperar antes los avales mineros, y para evitar obras costosísimas ante la responsabilidad derivada de riesgos de tipo catastrófico. Pero lo que era inicialmente una ventaja secundaria —conseguir una mayor integración ecológica y paisajística de los terrenos restaurados— se está convirtiendo en su principal uso. Esto es debido a una mayor conciencia ambiental global y al hecho de que el movimiento de tierras afecta ya con mucha frecuencia a ecosistemas y paisajes muy sensibles (véase la **figura VI**). A modo de resumen, si las soluciones de RG están bien aplicadas: i) consiguen mayor estabilidad, desde el corto al largo plazo, minimizando el mantenimiento; ii) pueden permitir un ahorro económico considerable, sobre todo evitando el uso de obra civil (obras estructurales de drenaje); y iii) logran, inequívocamente, una mayor integración visual y ecológica que los métodos convencionales.

6.2. Limitaciones

Sawatsky, Beersing y Ade (2008) resumen las restricciones más comunes para la adopción de la RG. En primer lugar, destacan «[...] la intransigencia de planificadores y diseñadores, que se resisten a cambiar los métodos tradicionales de restauración, basados en laderas uniformes y terraplenes o escombreras con bermas». Quizás, más que intransigencia, se trata simplemente de una resistencia al cambio, algo comprensible y humano. Respecto al coste, si bien la RG puede suponer ahorros significativos, también puede ser una limitación, por ejemplo, a la hora de remodelar escombreras o vertederos existentes. Sin embargo, puede obtenerse un gran ahorro económico si la RG se incluye en el proceso de planificación (Martín Duque *et al.*, 2020) y se adapta a la maquinaria existente. Dado que la RG elimina totalmente las bermas, esto puede limitar el acceso a determinadas zonas, si bien este aspecto también se puede solventar con una adecuada planificación que permita, por ejemplo, la inclusión de pistas por divisorias. Por último, la eficiencia para acumular grandes volúmenes de residuos o tierras ocupando el menor espacio posible puede verse reducida con la aproximación geomorfológica, cuya huella puede ser mayor, lo que implicaría mayores costes y mayor superficie transformada. Pero ello no ocurre siempre, y precisa ser evaluado.

6.3. Varias formas de equivocarse (lecciones aprendidas)

La aplicación de soluciones de RG (GeoFluv-Natural Regrade) en ejemplos construidos en España desde 2011 ha permitido obtener recomendaciones muy claras. La conclusión más nítida es que, si el método se aplica de modo adecuado, este funciona. Sin embargo, es relativamente común cometer una serie de errores en los procesos de diseño y construcción. Señalamos los más comunes:



➤ **Figura VII.** Imagen superior, detalle de un ejemplo de restauración geomorfológica «híbrida» (método australiano), con un fondo de cauce armado con rocas. Imagen inferior, proceso de restauración minera progresiva de base geomorfológica: un camión minero está descargando estériles en la parte superior de la escombrera, adaptada al diseño geomorfológico, mientras que a su pie toda la base de la escombrera ya está restaurada. Imágenes tomadas en minas de carbón de Hunter Valley (Nueva Gales del Sur, Australia). **Autor:** J.F. Martín.

- No respetar la altura y pendiente del nivel de base. Es decir, no conectar de modo preciso el colector que drena el interior de las zonas restauradas con el lugar al que entrega la escorrentía y los sedimentos.
- No prever ni manejar adecuadamente las entradas de escorrentía exterior hacia las zonas restauradas (*run-on*). Estas deberían conectarse con cauces adecuadamente diseñados para acoger los caudales que corresponda de modo no erosivo.
- No garantizar, de modo ortodoxo, recubrimientos edáficos ni de vegetación protectora (herbácea y de matorrales) en todas las superficies restauradas.

7. Reflexiones finales

En una guía sobre restauración ecológica es necesario dejar claro que, en cualquier perturbación ocasionada por movimiento de tierras, si no existe RG, sería difícil hablar de restauración ecológica, en tanto no hay una recuperación de la configuración y dinámica del medio físico de los ecosistemas degradados. Sin una reconstrucción experta de la topografía, de la hidrografía y de la arquitectura de los sustratos (según su comportamiento geotécnico e hidrogeológico) que simule configuraciones y dinámicas naturales, la recuperación ecológica estará siempre limitada. La aplicación de RG en minería es más fácil, pero más difícil en urbanismo e infraestructuras lineales, donde suelen existir limitaciones de diseño.

Si nos ceñimos a la minería, actividad que ha centrado la práctica totalidad de intervenciones de RG, es preciso tener en cuenta que las actividades extractivas oscilan entre la gran minería y la artesanal. Los métodos aquí descritos tienen un contexto de aplicación más adecuado en actividades y organizaciones con una mayor capacidad técnica y operativa y durante la fase de extracción. En estos ámbitos, la duda sobre la viabilidad de la RG es mínima. Ya se ha demostrado cómo grandes empresas multinacionales y nacionales han aplicado o están aplicando la RG manteniendo —e incluso incrementando— su competitividad. En empresas familiares o en actividades artesanales, si bien es más utópico pensar en el uso de diseños o modelos por ordenador o de equipamientos topográficos, lo cierto es que hay una cantidad importante de medidas de «sentido común geomorfológico» que se pueden implementar. Un ejemplo es el uso eficiente de formaciones superficiales como sustratos edáficos. O diseñar pequeñas trincheras que acojan el material movilizad desde frentes residuales de explotación, evitando la mala práctica de, bien recubrir los frentes, bien adosar los rellenos parciales al propio frente.

Casos prácticos recomendados

[55 LIFE TECMINE](#)

[53 LIFE RIBERMINE](#)

[26 EXPLOTACIÓN MINERA SAN LUIS](#)



➤ **Figura VIII.** Ejemplo de RG siguiendo el método del Talud Royal. Izquierda, final de la fase operativa. Derecha, acabado final. Carretera RN 19, Departamento de Alto Saona (Haute-Saône) Francia. La estructura del nuevo talud rocoso se articula a partir de sus discontinuidades. **Autor:** P. Royal.

Bibliografía

- Adams, D. (1979) *Guía del Autoestopista Galáctico*. Barcelona: Anagrama.
- Australian Government (2016) *Mine Rehabilitation*. Commonwealth of Australia, Canberra.
- Basha, N.A, Eplényi, A. y Sándor, G. (2021) Inspirative Geology- The Influence of Natural Geological Formations and Patterns on Contemporary Landscape Design, *Landscape Architecture and Art*, 17(17), pp. 39-48.
- Bladé, E., Cea, L. y Corestein, G. (2014a) Modelización numérica de inundaciones fluviales, *Ingeniería del Agua*, 18, 68.
- Bladé, E. et al. (2014b) Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), pp. 1-10.
- Bradshaw, A.D. y Chadwick, M.J. (1980) *The Restoration of Land*. Berkeley: University of California Press.
- Bugosh, N. (2000) Fluvial geomorphic principles applied to mined land reclamation. En: OSM *Alternatives to Gradient Terraces Workshop*. Farmington, NM: Office of Surface Mining.
- Bugosh, N. y Eckels, R. (2006) Restoring erosional features in the desert, *Coal Age*, 111(3), pp. 30-32.
- Bugosh, N. y Epp, E. (2019) Evaluating sediment production from native and fluvial geomorphic reclamation watersheds at La Plata Mine, *Catena*, 174, pp. 383-398.
- Bugosh, N. y Eckels R. (2022) *Geomorphic Reclamation Design*. (En prensa).
- Carlson Software (2022) Disponible en: <http://www.carlsonsw.com/support/manuals/>
- Dunne, T. y Leopold, L.B. (1978) *Water in Environmental Planning*. San Francisco: W.H. Freeman.
- DePriest, N. et al. (2015) Geomorphic landform design alternatives for an existing valley fill in central Appalachia, USA: quantifying the key issues, *Ecological Engineering*, 81, pp. 19-29.
- Environment Australia (1998) *Landform Design for Rehabilitation*. Canberra: Department of the Environment.
- España. 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. Boletín Oficial del Estado, 13 de junio de 2009, núm. 143. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2009-9841>
- FAO (1997) *Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentia*. Roma: Boletín de Suelos de la FAO, 68. Disponible en: <https://www.fao.org/3/t0848s/t0848s00.htm>
- Fleisher, K.R. y Hufford, K.M. (2020) Assessing habitat heterogeneity and vegetation outcomes of geomorphic and traditional linear-slope methods in post-mine reclamation, *Journal of Environmental Management*, 255, 109854.
- Foxley, A. (2010) *Distance & Engagement*. Zürich: Vogt Landscape Architects, Lars Müller Publishers.
- Gagen, P.J. y Gunn, J. (1988) A geomorphological approach to limestone quarry restoration. En: Hooke, J.M. Ed. *Geomorphology in Environmental Planning*. New York: John Wiley & Sons, pp. 121-142.
- Genie Geologique (2022) Talus Royal. Disponible en: <https://www.2g.fr/talus-royal>
- GeoFluv (2022) Disponible en: <https://www.geofluc.com/>
- Gómez Sal, A. y Nicolau, J.M. (1999) Hacia una caracterización ecológica de los paisajes degradados. Bases para su restauración. En: González Alonso, S. Ed. *Libro homenaje a D. Ángel Ramos*. Madrid: E.T.S.I. Montes, pp. 629-639.
- Gunn, J., Bailey, D. y Gagen, P. (1992) *Landform Replication as a Technique for the Reclamation of Limestone Quarries*. London: HMSO.
- Gunn, J. y Bailey, D. (1993) Limestone quarrying and quarry reclamation in Britain, *Environmental Geology*, 21, pp. 167-172.
- Hannan, J.C. (1984) *Mine Rehabilitation*. Sydney: New South Wales Coal Association.
- Hancock, G.R., Loch, R.J. y Willgoose, G.R. (2003) The design of post-mining landscapes using geomorphic principles, *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, pp. 1097-1110.
- Hancock, G.R. et al. (2010) A catchment scale evaluation of the SIBERIA and CAESAR landscape evolution models, *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, pp. 863-875.
- Hancock, G.R., Martín Duque, J.F. y Willgoose, G.R. (2019) Geomorphic design and modelling at catchment scale for best mine rehabilitation – the Drayton mine example (New South Wales, Australia), *Environmental Modelling and Software*, 114, pp. 140-151.
- Hancock, G.R., Martín Duque, J.F. y Willgoose, G.R. (2020) Mining rehabilitation- using geomorphology to engineer ecologically sustainable landscapes for highly disturbed lands, *Ecological Engineering*, 155, 105836.
- Hooke, R., Martín Duque, J.F. y Pedraza, J. (2012) Land transformation by humans, *GSA Today*, 22(12), pp. 4-10.
- Hooke, R.L. y Martín Duque, J.F. (2022) Impact of the Great Acceleration on Our Life-Support Systems. En: Shroder, J.J.F. Ed. *Treatise on Geomorphology*, vol. 9, pp. 167-186. Elsevier, Academic Press.
- Horton, R.E. (1945) Erosional development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology, *Bulletin of the Geological Society of America*, 56, pp. 275-370.
- Humphries, R.N. (1977) A new method for landscaping quarry faces, *Rock Products*, 80(5), 122H-122J.
- Humphries, R.N. (1979) Landscaping hard rock quarry faces, *Landscape Design*, 127, pp. 34-37.
- Iber (2022) Disponible en: <https://iberaula.es/>
- Kelder, I. y Waygood, C. (2016) Integrating the use of natural analogues and erosion modelling. En: Fourie, A. y Tibbett, M. Eds. *Mine Closure 2016*. Perth: Australian Centre for Geomechanics.
- Kite, J.S. et al. (2004) Impacts of surface mining and “AOC” reclamation on small streams and drainage network. En: Barnhisel, R.I. Ed. *Proceedings American Society of Mining and Reclamation 21st Annual National Conference*. Lexington: American Society of Mining and Reclamation, pp. 1120-1147.
- Landforma (2022) Disponible en: <https://www.landforma.com/>
- Legwaila, I., Lange, E. y Cripps, J. (2015) Quarry reclamation in England. A Review of Techniques, *Journal American Society of Mining and Reclamation*, 4, pp. 55-79.
- Loch, R.J. (2010) *Sustainable Landscape Design for Coal Mine Rehabilitation*. Australian Coal Association Research Program.
- LDI (2022) Landform Design Institute. Disponible en: <https://landformdesign.com/>
- Martín Duque, J.F. et al. (1998) A geomorphological design for the rehabilitation of an abandoned sand quarry in central Spain, *Landscape and Urban Planning*, 42(1), pp. 1-14.
- Martín Duque, J.F. et al. (2010) Restoring earth surface processes through landform design. A 13-year monitoring of a geomorphic reclamation model for quarries on slopes, *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, pp. 532-548.
- Martín Duque, J.F. et al. (2020) Geomorphic landscape design integrated with progressive mine restoration in clay quarries of Catalonia, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 35(6), pp. 399-420.
- Martín Duque, J.F. et al. (2021) A Somolinos quarry land stewardship history: From ancient and recent land degradation to sensitive geomorphic-ecological restoration and its monitoring, *Ecological Engineering*, 170, 106359.

Martín-Moreno, C. *et al.* (2016) Effects of topography and surface soil cover on erosion for mining reclamation. The experimental spoil heap at El Machorro mine (Central Spain), *Land Degradation & Development*, 27, pp. 145-159.

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

Mining Resource Consultancy (2022) Disponible en: <https://mresource.co.za/>

Mossa, J. y James, L.A. (2021) Geomorphic Perspectives on Mining Landscapes, Hazards, and Sustainability. En: Shroder, J.J.F. Ed. *Treatise on Geomorphology*, vol. 9. Elsevier, Academic Press, pp. 1-37.

Nicolau, J.M. (2003a) Trends in relief design and construction in opencast mining reclamation, *Land Degradation and Development*, 14, pp. 215-226.

Nicolau, J.M. (2003b) Diseño y construcción del relieve en la restauración de ecosistemas degradados: una perspectiva ecológica. En: Rey Benayas *et al.* Eds. *Restauración de Ecosistemas en Ambientes Mediterráneos*. Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá, pp. 173-188.

OSMRE (2022) Geomorphic Reclamation, Office of Surface Mining, Reclamation and Enforcement, US Department of Interior. Disponible en: <https://www.osmre.gov/programs/geographic-reclamation>

Restauración Geomorfológica (2022) Disponible en: <http://www.restauraciongeomorfologica.es> (en renovación).

Riley, S.J. (1995) Geomorphic estimates of the stability of a uranium mill tailings containment cover, Nabarlek, NT, Australia, *Land Degradation and Rehabilitation*, 6, pp. 1-16.

RIVERMorph (2022) Stream restoration software. Disponible en: <http://www.rivermorph.com/>

Rosgen, D.L. (1994) A classification of natural rivers, *Catena*, 22, pp. 169-199.

Rosgen, D.L. (1996) *Applied River Morphology*. Colorado: Wildland Hydrology, Pagosa Springs.

Sánchez Donoso, R., Bugosh, N. y Martín Duque, J.F. (2020) Use of remote-sensing tools to measure a fluvial geomorphic design-input parameter for land Reclamation, *Water*, 12, 2378.

Sawatsky, L. y Beckstead, G. (1996) Geomorphic approach for design of sustainable drainage systems for mineland reclamation, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 10(3), pp. 127-129.

Sawatsky, L. *et al.* (2000) Towards minimising the long-term liability of reclaimed mined sites. En: Haigh, M.J. Ed. *Reclaimed Land: Erosion Control, Soils and Ecology*. Rotterdam: Balkema, pp. 21-36.

Sawatsky, L.F., Beersing, A. y Ade, F. (2008) Configuration of Mine Closure Landforms — Geomorphic Approach. En: Fourie, A.B. *et al.* Eds. *Mine Closure 2008*. Perth: Australian Centre for Geomechanics.

Sawatsky, L. y Beersing, A. (2014) Configuring mine disturbed landforms for long-term sustainability, *Proceedings of Mine Closure Solutions*, pp. 26-30. Brazil: Ouro Preto, Minas Gerais.

Schor, H.J. y Gray, D.H. (2007) *Landforming*. Hoboken: John Wiley and Sons.

Slingerland, N., Zhang, F. y Beier, N.A. (2022) Sustainable design of tailings dams using geotechnical and geomorphic analysis, *CIM Journal*, 13(1), pp. 1-15.

SMCRA (1977) *Surface Mining Control and Reclamation Act*. Estados Unidos: Public law, 95-87, Statutes at Large, 91 Stat. 445. Federal Law.

Stiller, D.M., Zimpfer, G.L. y Bishop, M. (1980) Application of geomorphic principles to surface mine reclamation in the semiarid West, *Journal of Soil and Water Conservation*, pp. 274-277.

Strahler, A.N. (1964) Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. En: Chow, V.T. Ed. *Handbook of Applied Hydrology*, pp 4.40-4.74. New York: McGraw-Hill.

Toy, T.J. y Hadley, R.F. (1987) *Geomorphology and Reclamation of Disturbed Lands*. London: Academic Press.

Toy, T.J. y Black, J.P. (2000) Topographic reconstruction: the theory and practice. En: Barnishel, R. *et al.* Eds. *Reclamation of Drastically Disturbed Lands*. Madison: American Society of Agronomy, pp. 41-75.

Toy, T.J. y Chuse, W.R. (2005) Topographic reconstruction: a geomorphic approach, *Ecological Engineering*, 24, pp. 29-35.

Turrión, D. *et al.* (2021) Innovative Techniques for Landscape Recovery after Clay Mining under Mediterranean Conditions, *Sustainability*, 13, 3439.

VAST (2022) Disponible en: <https://vast-la.com/>

Vories, K.C. y Caswell, A.H. (2009) *Geomorphic Reclamation and Natural Stream Design at Coal Mines*. Bristol: US Department of Interior, Office of Surface Mining, Coal Research Center, Southern Illinois University Carbondale.

Waygood, C. (2014) Adaptative landform design for closure. En: Weiersbye, I.M. Ed. *Mine Closure 2014*. Johannesburg: University of the Witwatersrand, pp. 1-12.

Williams, G.P. (1986) River meanders and channel size, *Journal of Hydrology*, 88, pp. 147-164.

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

Zapico, I. *et al.* (2018) Geomorphic Reclamation for reestablishment of landform stability at a watershed scale in mined sites: The Alto Tajo Natural Park, Spain, *Ecological Engineering*, 111, pp. 100-116.

Zapico, I. *et al.* (2020) Stabilization by geomorphic reclamation of a rotational landslide in an abandoned mine next to the Alto Tajo Natural Park, *Engineering Geology*, 264, 105321.

Zapico, I. *et al.* (2021) Drainage network evolution and reconstruction in an open pit kaolin mine at the edge of the Alto Tajo Natural Park, *Catena*, 204, 105392.

Zhang, Z.F. *et al.* (2018) Conceptual model for hydrology-based geomorphic evapotranspiration covers for reclamation of mine land, *Journal American Society of Mining and Reclamation*, 7(2), pp. 61-88.