

# Nuevas soluciones para la integración ecológica y paisajística de distintos tipos de vertederos de estériles

**José F. Martín Duque**

Doctor en Geología, Universidad Complutense –  
Instituto de Geociencias, IGEO (CSIC-UCM)  
josefco@ucm.es

**Rafael Ceballos Jiménez**

Ingeniero de Montes  
raceji@gmail.com

**María Tejedor Palomino**

Licenciada en Ciencias Geológicas, Universidad  
Complutense, Madrid  
mariatejedor@ucm.es

El uso de reconstrucciones geomorfológicas que replican paisajes naturales, y la consideración de acompañar su construcción con la de estructuras columnares de tierra fértil, que permitan el desarrollo radicular óptimo de cualquier tipo de vegetación, supone un avance significativo en los trabajos de integración ecológica y paisajística de vertederos de estériles (RSU, RCD, obra civil, minería...). Esta conjunción mejora las técnicas convencionales, centradas todavía en la construcción de geoformas muy artificiales, en el uso de membranas, de dudosa viabilidad a largo plazo, y en la aportación de tierra fértil en capas de espesor reducido.

**Palabras clave:** Restauración geomorfológica, integración ecológica, integración paisajística, vertederos de estériles, escombreras.

## Introducción

Una de las características más definitorias de la sociedad actual es la generación de ingentes cantidades de residuos de todo tipo. Si bien la denominada “economía circular” pretende transformar este modo tan ineficiente de obtener recursos y energía, lo cierto es que, mientras tanto, nuestras sociedades producen, literalmente, montañas de residuos (mineros, de obra civil, urbanos, de demolición y construcción...). Estas acumulaciones reciben denominaciones muy distintas, en función de su naturaleza y actividad (*landfills, waste dumps, spoil heaps...* en inglés, y también ‘botaderos’ en muchos países de Sudamérica). Por poner un simple ejemplo respecto a la magnitud del proceso, la generación anual global de residuos mineros en el año 2011 alcanzó aproximadamente sesenta y cinco mil millones de toneladas, lo que equivalía a nueve toneladas por humano y por año (se insiste, para 2011). Estas ‘montañas’ se acumulan en todo tipo de localizaciones fisiográficas: rellenando valles y depresiones (figura 1), sobre laderas, o elevaciones en plataformas.

Los efectos ambientales de ese catálogo de vertederos son innumerables: modifican profundamente las redes naturales de drenaje, pueden afectar a la calidad de las aguas subterráneas, alteran el suelo y la vegetación y, en la mayor parte de los casos, constituyen verdaderas afrentas al paisaje visual.

El alcance de esas transformaciones tiene ya una escala global. Hooke (1994) demostró, hace 25 años, que el hombre se había convertido en el pri-

mer agente geológico del planeta. Y Hooke *et al.* (2012) cuantificaron cómo los humanos habíamos modificado, hace ya unos años, más del 50 % de la superficie terrestre.

Dos de los elementos que presentan una influencia muy negativa en los impactos ambientales generados por todo tipo de vertederos son: la escasa integración morfológica de los vertederos en su entorno, y la dificultad para implantar cubiertas vegetales, sobre todo arbóreas, debido fundamentalmente a las condiciones edáficas que tienen estas nuevas estructuras.



J. F. Martín Duque

Figura 1. Vertedero en la obra del tren de Alta Velocidad entre Medina y La Meca, Arabia Saudí, rellenando una depresión natural. Año 2014

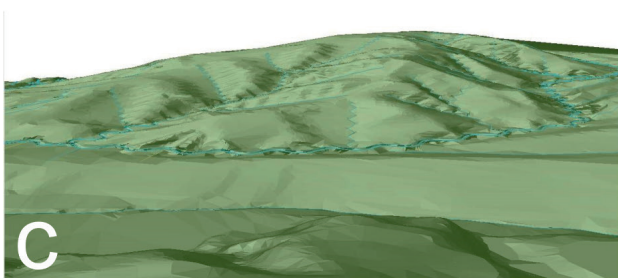
## La restauración geomorfológica

Desde hace ya varias décadas, aunque su desarrollo es aún minoritario, se vienen aplicando soluciones que permiten la integración geomorfológica e hidrológica de los vertederos en su entorno. Esta aproximación se ha perfeccionado sobre todo en el ámbito de las actividades extractivas. Aunque existen varias técnicas con estos fines, el método GeoFluv ha sido exitoso en su aplicación en minería desde el año 2000, momento de su implantación en Estados Unidos; concretamente para la restauración de grandes minas de carbón en el estado de Nuevo México. En el año 2005 se desarrolló el *software* Natural Regrade, que permite realizar diseños con el método GeoFluv en entornos CAD. ZAPICO *et al.* (2018) y BUGOSH y EPP (2019) incluyen una descripción de esta metodología y este software. Una explicación muy sintética de este método es la siguiente:

- (a) inicialmente se buscan referentes o análogos de geoformas de paisajes “naturales” y estables, desarrollados sobre materiales similares a los que se quiere restaurar, y que hayan sido modelados en un contexto climático, fisiográfico y ecológico similar a los paisajes que se pretende replicar;
- (b) sobre esos paisajes se mide toda una serie de variables morfométricas; por ejemplo, densidad de drenaje, longitud de los tramos convexos y

cóncavos de las laderas, índices de sinuosidad de la red fluvial, espaciado entre las vaguadas y subdivisorias que forman las laderas, etc.; estos parámetros de diseño se completan con otros de tipo climático, que permitan el uso de modelos hidrológicos (incluidos también en el *software*);

- (c) a partir de una topografía del espacio objeto de restauración, se determinan el nivel o los niveles de base locales (lugares a los que se pretende “entregar” la escorrentía generada), así como posibles entradas de agua desde cuencas adicionales, y se trabaja sobre el ajuste y adaptación de soluciones geomorfológicas e hidrológicas al espacio problema; estas incluyen un tratamiento específico de suelo y vegetación, cuya influencia en el modelo se traduce en el comportamiento de la escorrentía;
- (d) una vez realizadas distintas alternativas de diseño, se evalúa la viabilidad y estabilidad de las mismas, en términos de: (a) ajuste a los condicionantes volumétricos que proceda; (b) comprobación de la organización adecuada de la escorrentía; (c) comprobación de valores no erosivos en los cauces fluviales; (d) obtención de pendientes del terreno adecuadas; (e) y en general, comprobación de la estabilidad geotécnica, hidrológica y erosiva, con los modelos y herramientas que proceda (modelos geotécnicos, hidrológicos, de erosión del suelo, y de evolución del paisaje);



N. Bugosh

Figura 2. (a y b) Imágenes de la mina de carbón La Plata (Nuevo México, EEUU) en las que se puede apreciar un gran vertedero de residuos mineros situado fuera del hueco de explotación, antes de la restauración. (c) vista 3D de un modelo digital de elevaciones del diseño de restauración geomorfológica con GeoFluv - Natural Regrade para las localizaciones de las imágenes a y b. (d) vertedero de residuos mineros de las imágenes a y b ya remodelado de acuerdo con el diseño (de la imagen c), después del proceso de remodelado del terreno; es decir, las formas del terreno que constituyen el valle principal son estériles mineros recién remodelados y cubiertos de tierra fértil, justo antes de que la vegetación haya germinado



(e) estos nuevos paisajes “artificialmente naturales”, realizados mediante diseños asistidos por ordenador, se replantean en campo, y se construyen;

(f) finalmente, se procede a realizar un seguimiento de las superficies restauradas, para comprobar su grado de éxito.

Los artículos de ZAPICO *et al.* (2018) y BUGOSH y EPP (2019) desarrollan dos casos completos de aplicación de GeoFluv-Natural Regrade, que incluyen la localización de referentes, el diseño, la ejecución y el seguimiento. La figura 2 muestra algunas imágenes del caso de la mina La Plata, descrito en BUGOSH y EPP (2019).

## La cubierta vegetal

El estado actual de la técnica en la preparación del terreno para plantaciones con el objetivo principal de instalar una cubierta vegetal en vertederos y escombreras (ITGE, 1998), una vez obtenido el perfil topográfico del diseño final, se concreta en la incorporación y extendido sobre el terreno estéril de una capa de espesor de 5 a 30 cm de tierra fértil para la implantación de tapices herbáceos y semiarbusivos. Así mismo se lleva a cabo la apertura de hoyos, de profundidad también variable y de 0,5 m<sup>3</sup> de capacidad media, para su relleno con tierra fértil y plantación posterior de árboles y arbustos.

El fracaso de estas plantaciones en la mayoría de los casos, hablando de árboles, se debe a que ese acondicionamiento del terreno es muy pobre y no pone a disposición de la planta, de manera adecuada, el suficiente volumen de suelo fértil y estructurado que permita el normal y pleno desarrollo de las partes subterránea y aérea de un árbol adulto.

Consecuencias de esta deficiencia son el raquitismo y decaimiento de la planta, así como la inestabilidad y malformación en su crecimiento, que suele abocar, ante condiciones más o menos ventosas, al descalce y caída de los árboles; como sucedió hace poco, entre otros espacios públicos dispuestos sobre vertederos recuperados, en el parque del Cerro de las Canteras de Jaén.

Si bien el incremento de espesor de esa capa de suelo fértil de sellado pareciera ser una solución obvia, el caso es que los costes en que se incurre para la adquisición del volumen necesario de dicho suelo para un normal desarrollo de los árboles, añadidos a la pérdida de beneficios por la merma del mismo volumen en acogida de estériles, asciende en la mayoría de los casos a un importe que hace inviable la operación.

Los procedimientos actuales para la instalación de

la cubierta vegetal conducen a que la preparación del terreno y aportación de tierra vegetal se realice como una operación de acabado, una vez colmatado el vertedero. Sin embargo la nueva solución a que alude el título de este artículo desarrolla un método (BROSCHAT, L.; 2018) por el que el suelo fértil se aporta en forma de columnas insertas en el propio terreno desfavorable, de manera acompañada durante el proceso de vertido de los estériles. Una vez definido el diseño de la cubierta vegetal en función del paisaje en que se vaya a inscribir, sobre la superficie del terreno y a una cota concreta, cuya profundidad queda determinada por la geoforma obtenida para el vertedero y por las características anatómicas y fisiológicas de la especie arbórea que se proyecta implantar, se replantean los puntos de localización correspondientes al arbolado. A partir de dicha cota y sobre aquellos puntos determinados se levantan módulos tubulares que, a modo de encofrado, se rellenan con tierra fértil. La forma y dimensión de estos módulos es variable y está en función de la especie que se vaya a plantar en la cabeza de la columna. El volumen de suelo fértil que contenga permitirá y garantizará el desarrollo radicular óptimo de la especie vegetal de que se trate. (figura 3).

Los elementos modulares se rellenan y se super-

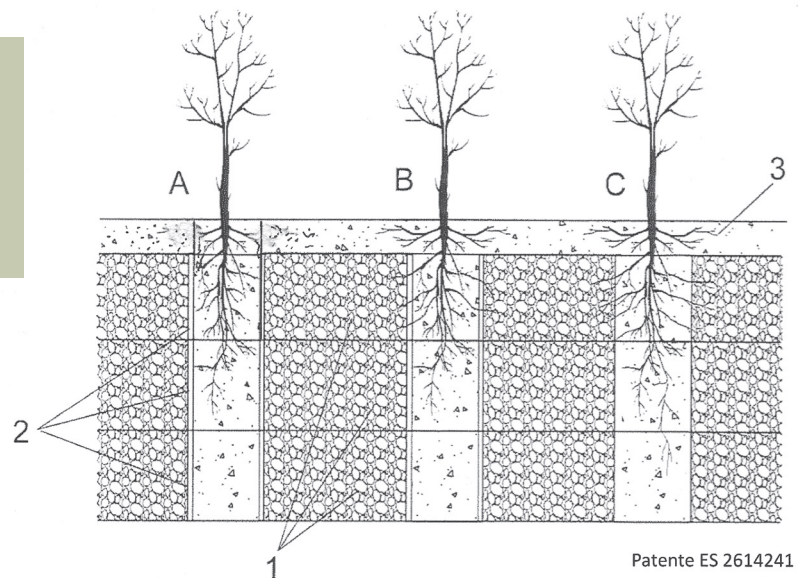


Figura 3. Esquema de las características de los módulos tubulares (2) y del desarrollo radicular (3) según las propiedades del material de vertido (1). En la columna A, el material es contaminante; los módulos son impermeables y no recuperables; el sistema radical se desarrolla íntegramente en la columna de suelo fértil. En la columna B, el vertido es inerte, heterogéneo y con elementos gruesos; los módulos pueden presentar perforaciones y pueden ser biodegradables; las raíces pueden emigrar por las oquedades, así como por la capa de cobertura. En la columna C, el material de vertido es inerte, homogéneo y fino; se emplea un solo elemento modular, rígido y deslizante; las raíces, desarrolladas en la columna de suelo fértil pueden emigrar libremente

ponen sucesivamente uno sobre otro, de manera ascendente y simultánea, según aumenta la altura de la propia escombrera. Sin embargo, no será necesario el apilamiento de módulos cuando la naturaleza de los materiales que componen el vertido sea no contaminante y la textura y la cohesión lo permitan, pudiendo utilizarse un único elemento que se irá remontando hacia la cota final (encofrado deslizante), al ritmo del crecimiento del vertedero.

Cualquier material sirve para fabricar los módulos, siempre que tenga la suficiente rigidez para soportar verticalmente la columna de suelo durante el proceso de vertido, extendido y compactación de los estériles. Si la naturaleza del vertido es contaminante, los módulos tienen que ser impermeables; mientras que, si la escombrera fuera inerte, estos elementos podrían ser permeables, biodegradables e incluso podrían estar perforados, para permitir la emigración de las raíces.

## Discusión y conclusiones


La restauración geomorfológica de vertederos de residuos mineros (*spoil heaps, waste dumps...*) es actualmente "relativamente común" a nivel mundial. En otras palabras, existe un desarrollo paulatino de esta práctica a nivel global, con numerosos ejemplos ya en Estados Unidos, Australia o España, y un impulso incipiente en Iberoamérica. Sin embargo, es prácticamente inexistente su aplicación a otros tipos de vertederos (obra civil, residuos sólidos urbanos, residuos de demolición y construcción...). Esta falta de transferencia a otros ámbitos no se debe, en realidad, a la distinta naturaleza de los vertederos, sino simplemente a que no se ha transmitido aún ese conocimiento y esa práctica.

El método de columnas de suelo fértil para crear la cubierta vegetal arbórea, ya incluido en proyectos

constructivos, está siendo aplicado actualmente en vertederos de RCD. Sin embargo, no se ha aplicado aún en minería, y menos en combinación con la restauración geomorfológica.

En este artículo se plantea la necesidad de combinar soluciones que son novedosas y eficientes, pero que aún no se han integrado. En definitiva, se propone avanzar hacia escenarios en los que se extienda más la restauración geomorfológica, que esta tenga un carácter "progresivo" o simultáneo en los procesos de integración y que, en este procedimiento de restauración progresiva, se acompañe su construcción con la de estructuras columnares de tierra fértil, que permitan el desarrollo radicular óptimo de cualquier tipo de vegetación, incluida la arbórea.

Estas técnicas pueden contribuir a cambiar las prácticas convencionales de restauración, remodelado y sellado de todo tipo de vertederos. El objetivo es que estos espacios dejen de funcionar, y de percibirse, como elementos totalmente extraños al entorno en el que se ubiquen, y que, por el contrario, se integren de tal modo en el medio natural que puedan constituir el soporte de nuevos ecosistemas y paisajes "naturales". Esta máxima integración se consigue: (a) al replicar geoformas naturales del entorno, con la directriz de complementar e integrarse en las cuencas hidrográficas existentes; (b) estableciendo cubiertas vegetales totalmente integradas en su entorno. Los autores de este artículo han elaborado dos proyectos de restauración de dos vertederos de residuos sólidos inertes, en Zalamea de la Serena y Fuentes de León (Badajoz), con este enfoque (MARTÍN DUQUE *et al.*, 2019a y 2019b).

La pregunta, en este caso, es si a estos espacios, una vez restaurados con este enfoque, deberíamos seguir llamándolos "vertederos". 

## Bibliografía

- BROSCHAT, L.; 2018 <http://consultas2.oepm.es/bopiwebStatic/34762076.pdf>. Método de preparación del terreno para la plantación paisajística en suelos desfavorables y sistema de puesta en práctica del mismo. *BOPÍ* Núm. 5082 enero 2018 (14).
- BUGOSH, N.; EPP, E.; 2019. Evaluating sediment production from native and fluvial geomorphic reclamation watersheds at La Plata mine. *Catena*, 174:383-389.
- HOOKE, R.; 1994. On the efficacy of humans as geomorphic agents. *GSA Today* 4(9):217-225.
- HOOKE, R.; MARTÍN DUQUE, J.; PEDRAZA, J.; 2012. Land transformation by humans: a review. *GSA Today* 22(12): 4-10.
- ITGE, (VV.AA.); 1998. Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería. Instituto Tecnológico y Geominero, Madrid.
- MARTÍN DUQUE, J. F.; TEJEDOR, M.; CERMEÑO, I.; CEBALLOS, R.; 2019a. Proyecto de ejecución del sellado geomorfológico experimental del vertedero de residuos sólidos inertes de Zalamea de la Serena (Badajoz). Junta de Extremadura y Ministerio para la Transición Ecológica.
- MARTÍN DUQUE, J. F.; TEJEDOR, M.; CERMEÑO, I.; CEBALLOS, R.; 2019b. Proyecto de ejecución del sellado geomorfológico experimental del vertedero de residuos sólidos inertes de Fuentes de León (Badajoz). Junta de Extremadura y Ministerio para la Transición Ecológica.
- MUDD, G. M.; BOGER, D. V.; 2013. The ever growing case for paste and thickened tailings: Towards more sustainable mine waste management. *AusIMM Bulletin* April: 56-59.
- ZAPICO, I.; MARTÍN DUQUE, J. F.; BUGOSH, N.; LARONNE, J. B.; ORTEGA, A.; MOLINA, A.; MARTÍN MORENO, C.; NICOLAU, N.; SÁNCHEZ, L.; 2018. Geomorphic Reclamation for reestablishment of landform stability at a watershed scale in mined sites: the Alto Tajo Natural Park, Spain. *Ecological Engineering*, 111: 110-116.