

Tecnosoles como alternativa circular para el cierre final de depósitos de desmonte: evaluación comparativa y optimización de coberturas en minería

Francisco Quevedo¹, Diego Arán^{2,3}

¹ Minera La Arena S.A. Zijin. Av. Canaval y Moreyra N° 480 Oficina 1201-B, Lima

² Inproyen Consulting S.A.C Av Las Camelias 877, Int 302, San Isidro, Lima

³ LEAF—Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food Research Center, Instituto Superior de Agronomía, Univ. Lisboa, Tapada da Ajuda, Lisbon, Portugal.

1. Introducción

El cierre de minas es un proceso clave en cualquier operación extractiva, metálico o no metálica que debe englobarse como un proceso de mejora contigua desde el inicio de la operación, con un enfoque de largo plazo e integrado no solo con una meta de cumplimiento ambiental sino también social. En los yacimientos cuya presencia está ligada a sulfuros metálicos, las gestiones de cierre se ven complicadas por los procesos de oxidación de los sulfuros a la exposición con el oxígeno en la intemperie, con la consiguiente formación de drenaje ácido de mina [1-2], y degradación ambiental por presencia de elementos potencialmente tóxicos en elevados contenidos y condiciones de pH muy bajas ($\text{pH} < 3.5$). Estas condiciones conllevan a que sea imposible el desarrollo directo de la vegetación [1,3-4], necesiéndose mejora de coberturas o correctivos para garantizar el éxito del cierre. El cierre con cobertura edáfica empleando el denominado “*topsoil*” en la mayor parte de las operaciones mineras tiene problemas asociados al mal manejo durante las etapas de extracción y acopio, no considerando las alteraciones que estos suelos sufren en el tiempo, no solo en aspectos físicos como compactación, sino también químicos como cambios en las condiciones pH-Eh, degradación de la materia orgánica, pérdida de retención de nutrientes o pérdida de la biodiversidad o funcionalidad microbiana, entre otros aspectos. Las acciones de mejora para el empleo de estos suelos preexistentes en las etapas de cierre por lo tanto pasan por un reacondicionamiento de sus características o propiedades, las cuales en la mayor parte de las situaciones es únicamente en una mejora de la fertilidad. En este sentido, la necesidad de cobertura de calidad que no atiendan solo a una productividad vegetal, sino que tengan una acción sobre los procesos geoquímicos de los materiales subyacentes. Las técnicas basadas en la naturaleza como la elaboración de Tecnosoles diseñados y la vegetalización asociada son una solución versátil que ya han sido implementados en diferentes escenarios con buenos resultados de mejora de las propiedades fisicoquímicas y biológicas de materiales degradados (suelos, sedimentos o escombreras), así como de sus lixiviados [3,5-12]. Los Tecnosoles son suelos cuya formación y propiedades están fuertemente influenciadas por las actividades humanas y las cuales contienen una cantidad significativa de artefactos ($>20\%$ en volumen)[13], y pese a que puedan ser creados a partir de la valorización de residuos orgánicos e inorgánicos, los procesos y evolución siguen los mismos mecanismos que los suelos naturales de las zonas adyacentes, con la ventaja de que se pueden crear con propiedades diversas y complementarios que de forma natural no coexistirían.

El objetivo de este estudio fue evaluar la efectividad y mejora de la calidad ambiental (agua-suelo-vegetación) de diferentes modelos de cierre que incorporan Tecnosoles, solos

o en modelos de combinación con los sistemas clásicos de capas de baja permeabilidad y drenantes en diferentes espesores.

2. Material y Métodos

El trabajo se desarrolló sobre el depósito de desmonte de la unidad Minera La Arena (Huamachuco, Perú) estableciendo 7 parcelas experimentales de diferentes cobertura edáfica, cubriendo taludes y bancales del depósito con una superficie variable (Tabla 1, Fig. 1). Tres coberturas con combinación con los modelos tri-capas convencionales con espesores optimizados del 50 y 75% en la arcilla-grava, dos parcelas con capas sintéticas (GCL -1.5 mm / Geocompuesto D8) y dos parcelas únicamente con Tecnosoles con espesores de 35 y 45 cm (Tabla 1). El seguimiento de la efectividad se realizó mediante monitoreos mensuales para la calidad de las coberturas a diferentes niveles, a través de indicadores físicos (erosión, agrietamientos, compactación), fisicoquímicos de la calidad de aguas superficiales y de subdrenaje (pH, potencial redox, conductividad eléctrica, contenidos de metales, metaloides y aniones), y mediante monitoreos semestrales para los parámetros fisicoquímicos a nivel de calidad de los suelos: materia orgánica, N y S total, P disponible, Capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenidos totales y disponibles, así como los indicadores biológicos a nivel de la estructura vegetativa (grado de cobertura, altura y biomasa). Para los muestreos de suelos se realizaron muestras compuestas de n=10 submuestras, y la estructura vegetativa determinada en cuadros de 1 m² con ocho repeticiones/parcela en las diferentes condiciones de relieve para garantizar la representatividad del monitoreo. La calidad de las aguas de escorrentía e infiltración también fue comparada por un tratamiento control (CON-DD2), una parcela sin cobertura adyacente a las parcelas implementadas. Por otro lado, se determinó el stock de C en el suelo y el aporte anual que deriva de la vegetación, estableciendo un parámetros de incorporación en base a coeficientes de entrada a SOC estable con un nivel conservador del 5%, no considerando la biomasa radicular generada por el sistema vegetal [14-15] y realizando la proyección de almacenamiento a 20 años como servicio ecosistémico complementario.

El clima en el área de estudio es templado medio a cálido e invierno suave a moderado de acuerdo con la clasificación bioclimática [16] y caracterizada por inviernos tipo *Citrus* y veranos tipo *Triticum* en los que se determina un régimen térmico de tierra fría alta y régimen de humedad tipo húmedo con un periodo libre de heladas mayor a 4 meses, de acuerdo con la clasificación agroclimática de Papadakis [17].

Tabla 1. Espesores de las capas de cada sistema de cobertura y superficie de las parcelas experimentales.

Tratamiento	Espesor capas (cm)				Superficie (m ²)
	Arcilla	Grava	Tecnosol	Sintético	
CV1	20	20	25	-	1470
CV2	15	15	25	-	1478
CV3	10	10	25	-	1375
CV4-GCL	-	20	25	GCL - 1.5 mm	498
CV4-AD8	-	-	25	Geocompuesto Andex D8	386
TEC-1	-	-	35	-	1418
TEC-2	-	-	45	-	1873

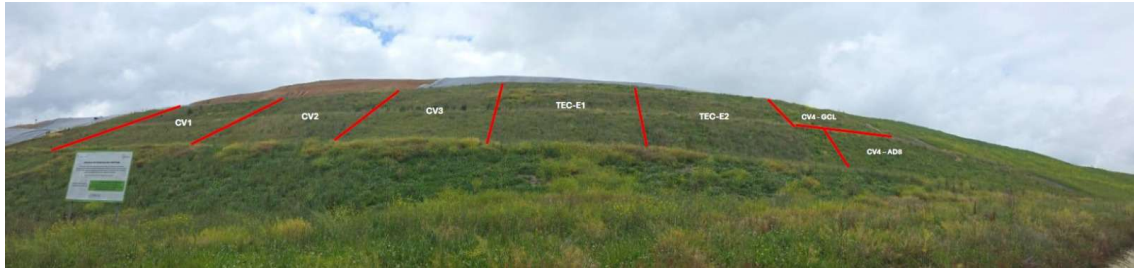


Figura 1. Ubicación y disposición de las 7 parcelas en el depósito de desmonte con 12 meses de aplicación.

3. Resultados y Discusión

A nivel de la calidad de las aguas tanto de escorrentía como de subdrenaje, el tratamiento control mostró condiciones ácidas en el rango de pH de 2 – 4, con elevadas conductividades eléctricas y condiciones redox en torno a los 500 mV, lo que realza el potencial acidificante y oxidante de los materiales del depósito. Estas condiciones conllevan a que el anión dominante sea el sulfato y acompañado de elevados contenidos de metales y metaloides (mg/L, Al:44-700; Cd:0.02; Co: 0.22 – 1.13; Cu: 2.53 – 46.8; Fe: 1.52 – 243; Mn: 0.22 – 108; Ni: 0.47-0.50; Pb: 0.05-0.76; Se: 0.06; Zn: 1.12 – 20.2). Por otro lado, todos los tratamientos con Tecnosoles a nivel de la escorrentía mostraron buenos resultados de calidad fisicoquímica, condiciones de reacción neutras a alcalinas (6 – 9.5), a excepción del tratamiento CV4-GCL que mantuvo una variabilidad en el rango de pH (4 – 7), con una clara influencia acidificante con los momentos asociados a una mayor precipitación. La conductividad eléctrica, así como los contenidos de sulfatos son bajos en todos los tratamientos, por debajo de los valores de estándar de calidad ambiental (ECA) categoría 3 [18]. Este mismo comportamiento fue observado a nivel de las aguas de subdrenaje sobre los materiales del depósito a 1.5 m de profundidad, condiciones de reacción neutras y bajos potenciales redox, lo que ponen en evidencia el consumo de oxígeno a través del Tecnosol. Los contenidos de metales y metaloides en disolución para las aguas de escorrentía cumplen los valores de referencia, no evidenciando contenidos relevantes que puedan causar un riesgo potencial al medio o la salud humana, mientras que los contenidos de estos elementos en las aguas del subdrenaje mantuvieron valores elevados para Mn y Cu, con valores heterogéneos en el periodo evaluado más asociado al régimen pluviométrico y sin diferencias entre los tratamientos.

La calidad de los Tecnosoles en todos los tratamientos presentó condiciones de reacción estables en el tiempo, con valores de pH en el rango 6.4 – 7.2, suelos de carácter neutros, con condiciones subóxicas ($E_h < 250$ mV) y conductividades eléctricas bajas (61 – 465 μ S/cm). La textura es franco arenosa, con un adecuado equilibrio de las partículas del suelo, facilitando tanto la oxigenación y enraizamiento, que junto con una estructura migajosa se define como un suelo estructurado y con adecuada retención hídrica. Los contenidos de C total en todos los tratamientos fueron elevados, con valores mayores a los 30 g/kg (Tabla 2), siendo dominado por la fracción orgánica, mayor al 85% y con contenidos de N total estables, en el rango de los 2 g/kg. La materia orgánica fue elevada [19-20], y con tendencia a la humificación, observándose a través de ratios C/N en torno a 15. Los contenidos de P disponible fueron elevados [19] para todos los tratamientos, no observándose diferencias entre los tratamientos (Tabla 2). Este mismo comportamiento se observó en la capacidad de intercambio catiónica, con valores elevados [20], entre los 16.9 a los 22.3 cmolc/kg, en el que el catión dominante fue el Ca.

Tabla 2. Principales características fisicoquímicas de las coberturas, su capacidad de almacenamiento de C y el stock proyectado a 20 años mediante el aporte de entrada SOC por la vegetación herbácea.

Trat.	C total	C org	N total	P Olsen	CICe	Stock C	Stock C 20 años
	g/kg			mg/kg	cmol _c /kg	tC/ha	tCO ₂ /ha
CV1	33.4±2.3	31.4±4.6	2.18±0.36	48.1±6.72	18.0±6.0	124.75	465.67
CV2	38.4±5.9	33.6±3.8	2.62±0.62	42.3±13.3	18.1±2.9	137.36	513.14
CV3	38.5±3.7	35.5±4.4	2.53±0.43	62.1±7.60	19.6±1.0	145.91	544.81
CV4-GCL	32.0±2.9	29.3±2.1	2.18±0.33	58.9±14.4	16.9±2.3	123.77	462.87
CV4-AD8	32.7±6.8	28.2±2.8	2.20±0.41	48.5±12.2	18.2±4.8	120.02	447.74
TEC-1	37.7±2.8	30.0±4.8	2.26±0.63	70.3±25.7	22.3±8.1	169.86	630.16
TEC-2	33.1±2.6	29.0±2.7	2.14±0.51	67.8±15.4	17.9±2.6	206.19	762.55

A nivel de los contenidos totales, los Tecnosoles presentaron elevados contenidos nutricionales, en g/kg: Ca (6.1 – 19), P (0.8 – 1.2), Mg (0.8 – 1.34) y K (1.6 – 2.5), así como bajos contenidos en los metales y metaloides, cumpliendo la normativa nacional [21], con excepciones puntuales del As, como elemento asociado a un posible fondo edáfico local. Los contenidos de metales y metaloides en la fracción disponible no presentaron un riesgo, siendo que la mayor parte presentó contenidos inferiores al límites de detección analítico. Este comportamiento también fue observado en otros estudios, en los que las propiedades neutro-alcalinas de los Tecnosoles junto con bajos potenciales redox y aporte significativo de materia orgánica favorecen procesos de inmovilización, como la complejación, precipitación o procesos de neoformación de fases de baja solubilidad [4,8]. La cobertura vegetativa alcanzó el 100% de la ocupación en todos los tratamientos y generó un aporte de C a través de la biomasa entre 2.09 a 2.69 tC/ha·año.

Por último, a nivel de potencialidades de aprovechamiento o mecanismos de financiación a través de remociones de C en los sistemas de cierre se observó que los Tecnosoles tienen una mayor capacidad de stock de C, frente los modelos mixtos. Además, la proyección de stock de C a 20 años alcanzó valores máximos de 762 tCO₂eq/ha (Tabla 2), con impacto relevante sobre la sostenibilidad de la compañía o la posibilidad de valorizar las mejoras del cierre y generar créditos de C u otros mecanismos de valorización de la recuperación ambiental.

4. Conclusión

El empleo de los Tecnosoles como coberturas de cierre, de forma directa o en combinación mixta con capas más clásicas de materiales de baja permeabilidad o geocompuestos fueron efectivos para el proceso de cierre. La calidad de las aguas de drenaje o subdrenaje demostraron un cumplimiento para la mayor parte de los elementos normados, bajo condiciones neutras a alcalinas. A nivel de la calidad del suelo se mantienen características de una elevada fertilidad y baja disponibilidad de elementos potencialmente tóxicos. Estos resultados demuestran la efectividad de los Tecnosoles como sistemas de cobertura que no solo contribuyen con la mejora de la calidad fisicoquímica, sino que también aportan beneficios al cierre, permitiendo modelos de aprovechamiento futuros, no limitando el enraizamiento profundo y contribuyendo con mecanismos de almacenamiento y fijación de C a través de los suelos.

5. Bibliografía

1. Abreu, M.M., Batista, M.J., Magalhães, M.C.F., Matos, J.X., 2010. *Acid mine drainage in the Portuguese Iberian Pyrite Belt*. In: Brock, C.R. (Ed.), *Mine Drainage and Related Problems*. Nova Science Publishers Inc., pp. 71–118
2. Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L., Weisener, C.G., 2003. *The Geochemistry of acid mine drainage*. In: *Treatise on Geochemistry*, Elsevier, 9, pp.149–204.
3. Santos, E.S., Abreu, M.M., Macías, F., de Varennes, A., 2016a. *Chemical quality of leachates and enzymatic activities in Technosols with gossan and sulfide wastes from the São Domingos mine*. *J. Soils Sediments* 16 (4), 1366–1382. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1068-8>.
4. Santos, E.S., Arán, D., Abreu, M.M., de Varennes, A., 2016b. *Engineered soils using amendments for in situ rehabilitation of mine lands*. In: Favas, P.J.C., Maiti, S.K. (Eds.), *Prasad M.N.V. Elsevier, Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation*, pp. 131–146. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812986-9.00008-7>.
5. Arán, D., Abreu, M.M., Diamantino, C., Carvalho, E., Santos, E.S., 2022. *Estrategia de cierre con Tecnosoles para la recuperación ambiental de la Mina de São Domingos*. *Revista de Ciências Agrárias* 45 (4), 811–820. <https://doi.org/10.19084/rca.28634>.
6. Arán, D., Santos, E.S., Abreu, M.M., Antelo, J., Macías, F., 2021. Use of combined tools for effectiveness evaluation of tailings rehabilitated with designed Technosol. *Environ. Geochem. Health* 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01118-3>.
7. Arán, D., Santos, E.S., Abreu, M.M., Macías, F., 2017. *Chemical and ecotoxicity evaluation of tailings rehabilitated using Technosol*. *EGU General Assembly 2017* (19), 17270.
8. Arán, D., Verde, J.S., Antelo, J., Macías, F., 2020. *Calidad ambiental de suelos y aguas de la Mina Fé: situación inicial y alternativas de recuperación*. *Span. J. Soil Sci.* 10 (1), 81–100. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2020.V10.N1.06>.
9. Macías, F., Macías-García, F., Nieto, C., Verde, J.R., Pérez, C., et al., 2011. *Gestión de residuos y cambio climático*. In: Mosquera, M.E.L., Osés, M.J.S. (Eds.), *Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola*. Servizo de Publicacións e Intercambio Científico de la Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, pp. 11–24.
10. Rodríguez-Vila, A., Asensio, V., Forján, R., Covelo, F., 2006. *Assessing the influence of Technosol and biochar amendments combined with Brassica juncea L. on the fractionation of Cu, Ni, Pb and Zn in a polluted mine soil*. *J. Soils Sediments* 16, 339–348. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1222-3>.
11. Santos, E.S., Abreu, M.M., Macías, F., 2019. *Rehabilitation of mining areas through integrated biotechnological approach: Technosols derived from organic/inorganic wastes and autochthonous plant development*. *Chemosphere* 224, 765–775. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.172>.
12. Santos, E.S., Pastrac Lungu, A., Arán, D., 2022. *Effect of Technosol application way on chemical quality of percolated leachates from sulfide-rich tailing*. *EGU General Assembly 2022*, EGU22–12756. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-12756>
13. IUSS Working Group WRB., 2022. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. 4th Ed. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.
14. Bai, Y., Cotrufo, M.F. *Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions*. *Science* 377, 603-608(2022). DOI:10.1126/science.abo2380
15. Malhotra, A., Moore, J. A., Weintraub-Leff, S., Georgiou, K., Berhe, A. A., Billings, S. A., Jackson, R. B. (2025). *Fine root and soil carbon stocks are positively related in grasslands but not in forests*. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 497.
16. UNESCO-FAO., 1963. *Clasificación bioclimática de las zonas mundiales*.
17. Papadakis, J., 1996. *Clasificación agroclimática de las regiones del mundo*. Ed. Científica Agroclimática.
18. Ministerio del Ambiente, 2017. *Estándares de Calidad Ambiental para Agua*. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, del 7 de junio de 2017. Gobierno de Perú. *El Peruano*, 10-19
19. De Varennes, A. *Productividade dos Solos e Ambiente*; Escolar Edit., Lisboa, Portugal, 2003; ISBN 972-592-156-9.
20. Veloso, A.; Sempiterno, C.; Calouro, F.; Rebelo, et al. *Manual de Fertilização das Culturas*, 3rd ed.; Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, I.P.—INIAV: Oeiras, Portugal, 2022; ISBN 978-972-579-063-2.
21. Ministerio del Ambiente, 2017. *Estándares de Calidad Ambiental para suelos*. Decreto Supremo N° 011-2017. Gobierno de Perú. *El Peruano*, 12-15.