

Sistemas de cobertura para el cierre final  
de pilas de lixiviación de minerales

Coverage systems for the final closure of  
mineral leaching heaps

Delahaye Carlos H.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Mineras, Facultad de Ingeniería, Universidad  
Nacional de San Juan, Av. Libertador San Martín 1109 oeste, San Juan, Argentina.  
delahaye@unsj.edu.ar



## RESUMEN

**E**n este trabajo se revisan las técnicas actuales de diseño, construcción y monitoreo de sistemas de cobertura para el cierre final de pilas de lixiviación de minerales, los cuales constituyen hoy en día un aspecto clave en la industria minera mundial. Los objetivos del diseño varían de un sitio a otro, aunque generalmente están relacionados con la estabilización física y química, uso del suelo y otros valores sociales. Las alternativas actuales de diseño de sistemas de cobertura para el cierre final de pilas de lixiviación incluyen: sistemas de cobertura de almacenamiento y liberación, sistemas de cobertura de almacenamiento y liberación mejorado, sistemas de cobertura tipo barrera y sistemas de cobertura constituidos por capas de material. La selección de un diseño de sistema de cobertura apropiado requiere de un análisis del impacto ambiental final en el entorno del sitio. El escenario de cierre seleccionado debe atenuar los niveles de concentración de contaminantes a niveles que puedan ser asimilados sin efectos adversos a largo plazo. También se analizan los siguientes aspectos fundamentales para garantizar que el comportamiento del sistema de cobertura sea sostenible a largo plazo: el diseño del relieve y la gestión del agua superficial, el control de calidad durante la construcción y el monitoreo de campo del sistema de cobertura.

**Palabras Clave:** pila de lixiviación, sistemas de cobertura, diseño, construcción, monitoreo.

## ABSTRACT

This paper reviews the current design, construction and monitoring techniques of coverage systems for the final closure of mineral leach heaps, which are nowadays a key aspect in the global mining industry. The design objectives vary from one site to another, although they are generally related to physical and chemical stabilization, land use and other social values. Current alternatives for the design of cover systems for the final closure of leaching piles include: storage and release coverage systems, storage and enhanced release coverage systems, barrier type coverage systems and coverage systems made of layers of material. The selection of an appropriate coverage system design requires an analysis of the final environmental impact on the

site environment. The selected closure scenario must mitigate levels of contaminant concentration at levels that can be assimilated without long-term adverse effects. The following fundamental aspects are also analyzed to ensure that the behavior of the coverage system will be sustainable in the long term: the design of the relief and surface water management, the quality control during construction and the field monitoring of the coverage system.

**Keywords:** leach, coverage systems, design, construction, monitoring.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de cobertura de suelos, también denominados sistemas de cobertura secos, son utilizados generalmente para el cierre de pilas de lixiviación agotadas. El objetivo principal del sistema de cobertura es restaurar la superficie de la pila a una condición estable y natural mientras se minimiza la degradación del ambiente circundante luego del cierre de la pila de lixiviación. Sus funciones son numerosas, pudiendo mencionarse, entre otras: el aislamiento de desechos, la limitación del ingreso de agua atmosférica y/o oxígeno, el control del movimiento ascendente de los constituyentes de agua de proceso y productos de oxidación, y proporcionar un medio para establecer una vegetación sostenible [1], [2], [3]. Los sistemas de cobertura pueden ser simples o complejos según estén constituidos por una única capa de suelo o por varias capas de diferentes tipos de materiales, incluyendo suelos nativos, material de sobrecarga adecuada, materiales de desecho no reactivos, materiales geosintéticos y materiales que consumen oxígeno [1]. La complejidad del diseño del sistema de cobertura depende de varios factores: el régimen climático en el sitio, la reactividad y la textura del material de la pila de lixiviación, el entorno hidrogeológico de la instalación y las propiedades físicas y químicas de los materiales de cobertura disponibles localmente.

En este trabajo se revisan los objetivos del diseño de sistemas de cobertura aplicables al cierre de pilas de lixiviación y las características claves del diseño, del relieve y de la gestión del agua superficial, así como de la construcción y rendimiento del sistema de monitoreo.

## OBJETIVOS DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE COBERTURA

La mayoría de los sistemas de coberturas colocados sobre el material lixiviado de la pila tienen la función clave de proteger el entorno de recepción aguas abajo después del cierre de la instalación [4], [5]. Para ello es necesario reducir la “percolación neta de agua meteórica” en la pila, lo que reduce los volúmenes de filtración de efluentes. Esta reducción en los volúmenes de filtración limita idealmente las concentraciones pico de contaminantes en las aguas receptoras a niveles que puedan asimilarse sin efectos adversos sobre el ecosistema acuático [2]. El sistema de cobertura es a menudo un componente integral del plan de cierre de una pila de lixiviación. Los objetivos del sistema de cobertura pueden variar de un sitio a otro pero generalmente incluyen [2]:

1. Estabilización física: Proporcionar control de polvo y erosión, particularmente erosión eólica y del agua de la pila, y actuar como una barrera para evitar el contacto directo del material de la pila con la flora y fauna.
2. Estabilización química: Estabilizar químicamente los desechos mineros a través del control del ingreso de oxígeno o agua y controlar la liberación de contaminantes a través del control de la infiltración;
3. Cumplir con los objetivos de uso de la tierra y otros valores sociales: Proporcionar un medio de crecimiento para el establecimiento de vegetación sostenible y recuperar el área para los usos deseados del terreno después del cierre.

Para cumplir estos objetivos es necesario definir dos procesos claves: el balance hídrico superficial y el balance energético de la superficie [2]. El balance hídrico superficial depende de muchos factores, principalmente clima, tipo de suelo y entorno hidrogeológico. De estos factores, el entorno hidrogeológico de la pila de lixiviación ejerce un control predominante sobre los requisitos del sistema de cobertura. El balance energético de la superficie describe el cambio neto de energía en la superficie durante un período de tiempo determinado. La radiación entrante de onda corta y larga, el calor del cambio de fase del agua y la conducción de calor desde el suelo circundante aportan la energía a la superficie. La energía se elimina de la superficie debido a la radiación saliente, el calor eliminado del cambio de fase del agua y la conducción de calor al suelo circundante.

## ALTERNATIVAS DE DISEÑO DE SISTEMAS DE COBERTURAS

Se ha diseñado y construido una amplia gama de tipos de cobertura en instalaciones mineras en todo el mundo. MEND [1], [2] e INAP [3] describen las principales alternativas de diseño de sistemas de cobertura aplicables al cierre de pilas de lixiviación (Tabla 1).

Tabla 1: Alternativas de diseño del sistema de cobertura. Cierre de pilas de lixiviación.

Categoría	Mejor adecuada para:	Atributos clave
Sistema de Cobertura de Almacenar-y-Liberar (Sistema de Cobertura ET)	Climas áridos y semiáridos. Tasas de percolación neta altas (10-40% de MAP <sup>1</sup> ). No requiere control de entrada/salida de gas.	~ 1-2 m de tierra bien graduada o material inerte de residuos run-of-mine (ROM). <i>La cobertura vegetal sostenible es crítica. Puede ser necesario la nivelación del relieve para el derrame de aguas de escorrentía.</i>
Sistema de Cobertura Mejorado de Almacenar-y-Liberar	Climas áridos y semiáridos. Tasas de percolación neta moderadas (10-40% de MAP). No requiere control de entrada / salida de gas.	~ 1-2 m de tierra bien graduada o material inerte de residuos ROM superpuesto a una Capa de Permeabilidad Reducida (CPR). La CPR puede ser material de pila de lixiviación erosionado compactado en superficie o una capa de rotura capilar. <i>La longevidad de la CPR debe abordarse durante la etapa de diseño. Se requiere un diseño de relieve más robusto para evitar la erosión.</i>
Sistema de Cobertura Tipo Barrera	Climas húmedos y semi húmedos. Tasas de percolación neta bajas (5-10% de MAP). Control de entrada/salida de gas deseable.	~ 1 m de medio de crecimiento/capa protectora que recubre una Capa de Baja Permeabilidad (CBP). La CBP puede ser arcilla compactada, arena-bentonita o capa permanentemente congelada. <i>La longevidad de la CBP debe abordarse durante la etapa de diseño. Se requiere un diseño de relieve más robusto para evitar la erosión.</i>
Sistema de Cobertura con Diseño en Capas	Climas húmedos y semi húmedos. Tasas de percolación neta muy bajas (<5% de MAP). Control de entrada / salida de gas deseable.	~ 1 m de medio de crecimiento/capa protectora que recubre un Revestimiento de Geomembrana (RG), e.g. LLDPE, GCL, BMG <sup>2</sup> . Generalmente requieren capas de asiento y de drenaje. <i>La longevidad del RG debe abordarse durante el diseño. Costo elevado. Se debe considerar la longevidad del RG. Requiere un diseño robusto del relieve.</i>
1. MAP = Precipitación Media Anual. 2. LLDPE = Polietileno Lineal Baja Densidad; GCL = Revestimiento de Arcilla Geosintético; BGM = Revestimiento de Geomembrana Bituminosa.		

## DISEÑO DEL SISTEMA DE COBERTURA

El análisis de impactos del entorno receptor constituye un componente clave en el desarrollo de un diseño de sistema de cobertura apto para el cierre de una pila de lixiviación. Los impactos ambientales específicos a evaluar dependen de los objetivos del diseño del sistema de cobertura propuesto junto con el plan de cierre del sitio, así como los compromisos del gobierno local y nacional. El objetivo es selec-

cionar un escenario de cierre que atenúe las concentraciones máximas de los contaminantes de interés en el entorno receptor a niveles que puedan asimilarse sin efectos adversos a largo plazo. Los criterios de cierre desarrollados sobre la base de un sitio específico, proporcionan la base para medir el rendimiento de campo del sistema de cobertura y determinar si está “funcionando” [6].

O’Kane and Wels [4] presentan un enfoque “típico” para el diseño de un sistema de cobertura. La compañía SAG/SDAG Wismut en Alemania desarrolló un procedimiento para el diseño del sistema de cobertura basado en la selección y prueba de sistemas coberturas adecuados al sitio y en el desarrollo de procedimientos de aseguramiento y control de calidad para la colocación de las coberturas. SRK Consulting realiza una revisión y propone un procedimiento formalizado para el diseño de un sistema de cobertura, el cual se muestra en la Figura 1. Este procedimiento se ha seguido con éxito en un número de casos reales [7].

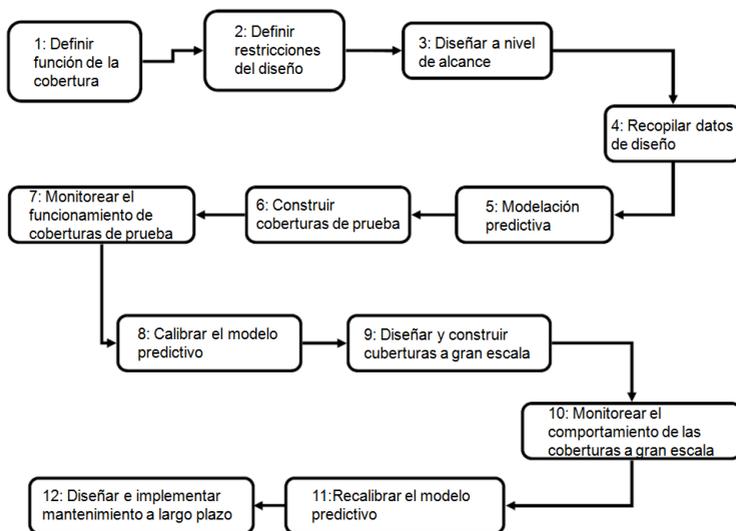


Figura 1: Procedimiento para el diseño del sistema de cobertura [7]

Rykaart and Caldwell [7] indican que más allá de algunos casos de estudio, el trabajo experimental a escala piloto ha estado limitado a

estudios de investigación en forma de parcelas de prueba experimentales, que no han conducido específicamente a un diseño detallado del sistema de cobertura a escala completa. Por otro lado, hay una serie de casos de estudio donde la construcción de la cubierta se ha completado sin trabajo a escala piloto, con el rendimiento de la cubierta basado únicamente en el modelado numérico no calibrado (es decir, omitiendo los pasos 6 a 8). Para estos casos de estudio, la supervisión del rendimiento se implementa en conjunto con la construcción del sistema de cobertura con el objetivo de probar el diseño. Asimismo, la mayoría de las cubiertas de escala completa se construyen sin pruebas de escala piloto o monitoreo de calibración (se pasa directamente del Paso 5 al 9).

## **DISEÑO DEL RELIEVE Y GESTIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES**

El desarrollo de un paisaje sostenible para el cierre de mina implica el desarrollo de accidentes geográficos que reproduzcan paisajes naturales. La replicación de sistemas naturales maduros y relativamente estables reduce la tasa y el riesgo de erosión acelerada. McKenna y Dawson [8] recorrieron minas operativas abandonadas y parcialmente recuperadas, creando un inventario de las prácticas de cierre de minas y del rendimiento físico y de los impactos ambientales de las minas recuperadas y abandonadas. El inventario muestra que el mayor riesgo físico para los paisajes está asociado con la erosión de cárcavas y el restablecimiento de cursos de drenaje de aguas superficiales. La mala gestión del agua superficial y la inestabilidad de la forma de relieve son factores comunes que conducen al fracaso de los sistemas de cobertura de desechos mineros en todo el mundo [1]. Estos factores son mucho más prevalentes en sitios situados en regiones frías donde los procesos tales como el levantamiento de escarcha y el deshielo pueden disminuir sustancialmente la integridad y el rendimiento de una forma de relieve de mina recuperada [2]. La incorporación de características de los taludes naturales en el diseño final del relieve de los depósitos no solo mejora la estética, sino que también emula las pendientes en equilibrio con las condiciones locales de lluvia, tipo de suelo y cubierta vegetal [9]. El aumento relativamente pequeño en los costos de ingeniería y construcción para crear formas naturales del relieve se ve más que compensado por un atractivo visual mejorado, menores cos-

tos de mantenimiento de las pendientes y estabilidad mejorada a largo plazo. Además, la construcción de formas mineras del relieve que se mezclan visualmente con el paisaje circundante tiene un considerable valor en las relaciones públicas para los operadores. El diseño del paisaje depende de numerosos factores, incluidos el clima, la geología, los suelos, los patrones hidrogeológicos locales, la topografía y el uso final de la tierra [10]. Un gran desafío relacionado con el diseño de la forma de relieve es el objetivo de la sostenibilidad a largo plazo; los plazos de diseño pueden ser del orden de cientos de años. Los cambios que ocurrirán durante este período son difíciles de predecir y cuantificar, pero afectarán el sistema.

### **CONSTRUCCIÓN Y RENDIMIENTO DEL MONITOREO**

Es fundamental que se construya un sistema de cobertura con un buen control de calidad para garantizar que sea representativo del diseño real. El efecto de una construcción inadecuada de un sistema de cobertura, o un QA/QC deficiente durante la construcción, puede tener una influencia dominante en la longevidad del sistema. La medición directa en el campo es la metodología preferida para medir el rendimiento de un sistema de cobertura para pilas de lixiviación y demostrar a todas las partes interesadas que el sistema de cobertura funcionará según lo diseñado [1], [10], [2]. Se prefiere un enfoque de “cuenca” para el monitoreo a fin de obtener una mejor comprensión del rendimiento del sistema de cobertura en condiciones específicas del sitio. Aunque la mayoría de las técnicas de monitoreo utilizadas en el monitoreo del sistema de cobertura a escala puntual se pueden aplicar para el monitoreo del sistema de cobertura a macro escala, el alcance del monitoreo del rendimiento para un sistema de cobertura a macro escala es mucho más amplio que el correspondiente a escala puntual. La supervisión y evaluación del rendimiento de un sistema de cobertura a macro escala considera la variabilidad temporal y espacial de los conjuntos de datos medidos en campo. La frecuencia de monitoreo para obtener datos suficientes, asociada con la instrumentación espacial y la adquisición de datos temporales, debe entenderse bien para implementar un sistema de monitoreo rentable. Al diseñar un programa de control del rendimiento del sistema de cobertura, se deben considerar las diferencias entre zonas de pendiente ascendente y descendente, debido a las diferencias en la escorrentía y la infiltra-

ción en una superficie inclinada. La heterogeneidad en la distribución del tamaño de partícula del material del sistema de cobertura también dará lugar a pequeñas diferencias en el rendimiento del sistema de cobertura. Los sistemas de monitoreo del rendimiento del sistema de cobertura deben automatizarse en la medida de lo posible para evitar que se pierda la recopilación de datos durante las épocas clave del año (por ejemplo, durante y después de los eventos de tormentas). Además, el uso de sistemas automáticos para la recopilación de datos reduce en gran medida la necesidad de intervención humana y, en particular, las demandas impuestas al personal de la mina.

### **OBSERVACIONES FINALES**

- La filosofía de diseño recomendada para un sistema de cobertura de cierre de una pila de lixiviación es aquella que integra el material de lixiviación dentro de su contexto medioambiental. Esto contrasta con la idea de que el aislamiento del material lixiviado respecto del entorno debe evitar por completo la producción de filtración contaminada.
- El sistema de cobertura debe diseñarse como un sistema no saturado expuesto a la atmósfera, cuyo rendimiento será significativamente influenciado por las condiciones climáticas estacionales, anuales y de largo plazo del sitio.
- Dado que el sistema de cobertura y el material de la pila están constituidos por “suelos”, la descripción del comportamiento hidromecánico del medio poroso debería enfocarse desde la perspectiva de la mecánica de los suelos no saturados.
- El comportamiento de un sistema de cobertura cambiará con el tiempo como resultado de diversos procesos físicos, químicos y biológicos. Los cambios deben tomarse en cuenta anticipadamente para evitar el efecto adverso en el rendimiento a largo plazo.
- Aspectos que requieren mantenimiento, pero que rara vez se reconocen por adelantado incluyen el transporte de sedimentos, el asentamiento (tanto de la consolidación como el deshiele) y la degradación física (como resultado de los ciclos húmedo / seco o de congelación / descongelación).

## REFERENCIAS

1. MEND (Mine Environment Neutral Drainage). “Design, construction and performance monitoring of cover systems for waste rock and tailings”. Canadian Mine Environment Neutral Drainage Program, Project 2.21.4, July. 2004
2. MEND (Mine Environment Neutral Drainage). “Cold regions cover system design technical guidance document”. Canadian Mine Environment Neutral Drainage Program, Project 1.61.5c, March. 2012
3. INAP (International Network for Acid Prevention). “Evaluation of the long-term performance of dry cover systems”, Final Report. Prepared by O’Kane Consultants Inc., Report No. 684-02, March. GARD Guide. <http://www.gardguide.com/>. 2011
4. O’Kane, M. and Wels, “Mine waste cover system design – linking predicted performance to groundwater and surface water impacts”. Proc. 6th Int. Conf. on Acid Rock Drainage (ICARD), Farrell and Taylor Eds., July 14-17, QLD, Australia. 2003.
5. Ayres B. and O’Kane, M. “Design, Construction, and Performance of Closure Cover System for Spent Heap Leach Piles - A State-of-the-Art Review”. Proceedings of the Heap Leach Conference, Vancouver, 22-25 September 2013, 1-12. 2013.
6. O’Kane, M. and Ayres, B. “Cover systems that utilise the moisture store-and-release concept – do they work and how can we improve their design and performance?” Proc. of Mine Closure. Fourie and Tibbett Eds., Sep. 25-27, QLD, Australia. 2012.
7. Rykaart, M. and Caldwell, J. “Covers. Sate of the Art Review”. InfoMine, Mining Intelligence & Technology. [www.infomine.com](http://www.infomine.com). 2006.
8. McKenna, G.T. and Dawson, R. “Closure planning practice and landscape performance at 57 Canadian and US mines”. Draft, July 18, 1997.
9. Ayres, B., Dobchuk, B., Christensen, D., O’Kane, M. and Fawcett, M. “Incorporation of natural slope features into the design of final landforms for waste rock stockpiles”. Proc. of 7th Int. Conf. on Acid Rock Drainage, R.I. Barnhisel Ed., March 26-30, St. Louis, MO, USA, 59-75. 2006.
10. MEND (Mine Environment Neutral Drainage). “Macro-scale

cover design and performance monitoring manual”. Canadian Mine Environment Neutral Drainage Program, Project 2.21.5, September. 2007.