

RED DE DRENAJE EN PLATAFORMAS DE LIXIVIACIÓN EN TÉRMINOS DEL MEJOR SERVICIO Y REDUCCION DE COSTOS¹

Por Mark E. Smith², PE, GE
Aigen Zhao³, PhD, PE

Lixiviación en pilas es una tecnología de procesamiento de minerales cuando las pilas de mineral chancado o de la mina (o tal vez, relaves de molinos) son lixiviados con varias soluciones químicas con el fin de extraer minerales valiosos. Las instalaciones mayores en lo que se refiere al área de la pila y el tonelaje anual son asociadas con minas de cobre donde el mineral portador de cobre es irrigado con una solución de ácido sulfúrico débil. Esta solución disuelve el cobre del mineral y la Solución de Lixiviación Rica (PLS) resultante se filtra a través de las pilas para ser recuperada en el fondo de la pila de lixiviación, que normalmente consiste en un revestimiento de geomembrana o de arcilla (con el fin de asegurar un verdadero revestimiento compuesto, o, en la mayoría de los casos, simplemente como una capa de acolchonado de buena calidad para la geomembrana), y una capa protectora de roca chancada permeable con la red una tuberías de drenaje. En algunas aplicaciones (principalmente, en los casos de minerales de óxido de cobre) los revestimientos delgados son instalados entre las capas de mineral con el fin de interceptar la SLR más rápido. La extracción de cobre se realiza a través del proceso de electro extracción (electrowinning) seguido por reciclaje (retorno) de la solución ácida a la pila de lixiviación. El funcionamiento de las pilas de lixiviación de oro es similar, sólo que se emplea el solvente de una solución de cianuro alcalina.⁴

Las pilas de lixiviación pueden ser divididas en cuatro categorías: las pilas convencionales o planas; plataformas de lixiviación en botaderos; rellenos de valles, y las pilas dinámicas (on/off).

Las plataformas de lixiviación convencionales son relativamente planas, niveladas planamente o según los contornos del terreno, con sedimentos aluviales suaves y el mineral es normalmente chancado y apilado en capas relativamente delgadas (típicamente de 5 a 15 m de espesor). Los sistemas de lixiviación en botaderos son similares o pueden incluir terreno rodante; el término "botadero" usualmente significa que las capas son mucho más gruesas (hasta 50 m) y frecuentemente se apila el mineral directamente de la mina (ROM, sin chancado previo). Los sistemas de relleno de valle simplemente son las plataformas de lixiviación diseñadas en valles naturales con un dique de soporte en el fondo del valle, o con un relleno nivelador dentro del mismo. Para estos

¹ De: Geotechnical Fabrics Report, Mayo, 2004.

² Mark Smith es el vice-presidente de operaciones de Vector Engineering, Inc. en Sud América, smith@vectoreng.com

³ Aigen Zhao es el vice-presidente de ingeniería para Tenax Corporation. AZhao@tenax.com

⁴ Thiel, R. y M. E. Smith, "State of the Practice Review: Heap Leach Pad Design Issues," presentado en la reunión bi-anual del Instituto de Investigaciones de Geosintéticos, en Las Vegas, Nevada, USA, Diciembre 2003 y publicado en los procedimientos de la conferencia.

tres tipos de plataformas de lixiviación el proceso es similar: una capa nueva se coloca encima del mineral lixiviado (ripios) y luego el proceso se repite. Las alturas finales de pilas varían de 50 a 135 m ($\gamma_{\text{seco}} \approx 1,450$ a $1,750 \text{ kg/m}^3$).

Las plataformas dinámicas, o plataformas on-off, reciben una sólo capa del mineral, típicamente de 4 a 8 m de espesor. Dicha capa es lixiviada por un período establecido, seguido por una irrigación, y finalmente, los ripios se conducen hasta el lugar de disposición. A continuación, la plataforma recibe una nueva carga del mineral y todo el ciclo se repite. Los ciclos de lixiviación se encuentran en un rango de 2 a 12 meses y la duración de funcionamiento de instalaciones puede exceder 20 años.

Sistemas de Revestimiento de Plataformas de Lixiviación Típicos

El sistema de revestimiento más común es una geomembrana colocada ya sea sobre una subrasante preparada o sobre una sección compuesta de arcilla de poco espesor (típicamente entre 200 a 300 mm de arcilla). En la mayoría de las pilas de lixiviación se utiliza HDPE o LLDPE de 1.5mm, si bien en el caso de rellenos en valle profundos una alternativa común para pilas convencionales es el empleo de HDPE o LLDPE de hasta 2.5mm y PVC de 1.0mm

Desde que las instalaciones de plataforma de lixiviación emplean el sistema de lixiviación activo, que incluye irrigación continua del mineral con el objetivo de recuperación de metales, el drenaje de pilas es crítico para la estabilidad, el control de filtraciones y la recuperación de metal. Adicionalmente, el sistema de drenaje funciona como una capa protectora de revestimiento (con frecuencia referido como "overliner") y normalmente consiste en una capa de roca chancada de 300 a 1,500 mm (el tamaño máximo de partículas común es de 25 a 40 mm) con tuberías de drenaje perforadas y a poca distancia una de otra (de 2 a 10 m). Ocasionalmente, se usan capas de drenaje geosintéticas, principalmente en los casos de relleno de valle con los taludes de valles empinados cuando la colocación de grava es difícil y arriesgada.

En las plataformas dinámicas se emplean mayormente sistemas de revestimiento más robustos y las capas protectoras son más gruesas, a veces compuestas de dos capas con el fin de crear una capa relativamente gruesa. Dicha capa cumple con la función de protección adicional para el revestimiento y el sistema de drenaje, frente a las operaciones repetidas del equipo de carga/apilamiento y descarga. La aplicación más común incluiría un capa de 1,000 a 1,500 mm incluyendo una capa de drenaje nivelada abierta de -25 a -40 mm colocada directamente en la geomembrana, y cubierta con una capa de protección de roca chancada gruesa del botadero (o el mineral chancado), teniendolas partículas un máximo de 100 a 200 mm. Las tuberías de drenaje serán colocadas directamente en la geomembrana y dentro de la capa del fondo.

Resumen de Técnico del Drenaje Sintético

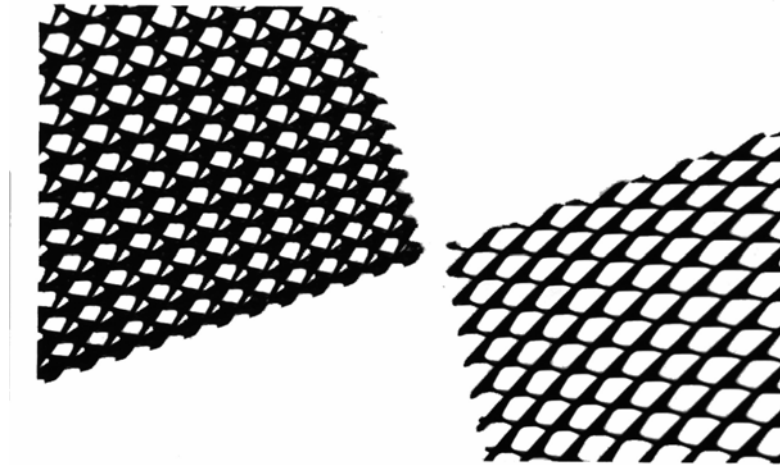
Las capas de drenaje líquido en la base de plataformas de lixiviación deben cumplir con los siguientes requisitos:

- tener la permeabilidad de flujo suficientemente alta para permitir las filtraciones desde el material de relleno adyacente;
- mantener una capacidad de flujo de plano suficiente para reducir la carga hidráulica encima del revestimiento;
- resistir cargas compresivas de corto y largo plazo,
- proporcionar estabilidad adecuada.

Durante el proceso de evaluación y selección de capas de drenaje potenciales, un ingeniero diseñador, podría considerar (típicamente) dos opciones: materiales naturales o productos de drenaje geosintéticos. La ventaja de los materiales naturales es que conocidos o familiares para los ingenieros geotécnicos, tanto como el espesor adecuado de las secciones transversales. Sin embargo, el uso de materiales naturales origina problemas de factibilidad de construcción y de aseguramiento de la calidad, incluyendo: la estabilidad de taludes laterales; daños a la geomembrana; el cronograma y secuencia de instalación; y la consistencia y calidad del tipo de relleno, tanto, como su profundidad. Por otro lado, el empleo de geocompuestos en las instalaciones de drenaje tiene muchas ventajas, por ejemplo, la facilidad de instalación en los taludes, consistencia en las propiedades de materiales inherentes con los materiales de fabricación y en muchos casos esto significa ahorros en los costos.

Basados en su estructura se distinguen dos tipos comunes de geonets de drenaje: el bi-planar y tri-planar. Los Geonets Bi-planares, como implica su nombre, consisten en dos capas de cuerdas sobrepuestas una encima de otra; los geonets Tri-planares consisten en dos capas de cuerdas separadas por costillas verticales gruesas, creando un canal de flujo ancho. La fotografía 1 muestra estos dos tipos de geonets.

El desarrollo de geonets de drenaje se ha propuesto lograr una capacidad de flujo en-plano superior (trasmisividad) y reducir la compresibilidad de término largo de la estructura de geonet. Los geonets Bi-planares tienen ciertas limitaciones debido a sus estructuras. Por ejemplo, el aumento de espesor de las costillas puede resultar en una estructura inestable con baja resistencia a desplazamiento por compresión; y el aumento de porosidad en-planar a través de aumento de espacio entre las costillas originando una mayor intrusión del geotextil en el núcleo del geonet. El geonet tri-planar, sin embargo, elimina las limitaciones del geonet bi-planar. El plano de flujo primario del geonet se localiza entre el plano superior e inferior del flujo secundario. Los planos superiores e inferiores auxiliares de flujo acomodan la intrusión de geotextiles empleados con el geonet con la finalidad de filtración o protección. La fotografía 2 proporciona una vista detallada de la estructura tri-planar.



**Foto 1. Fotos de diferentes tipos de productos de drenaje geonet.
(A la izquierda: tri-planar, a la derecha: bi-planar)**

El geonet tri-planar incorpora las costillas medias verticales (construidas) para ser más fuertes que las costillas inclinadas del geonets bi-planar. La comparación de resistencia compresiva entre el geonet tri-planar y el geonet bi-planar se muestra en la Figura 1. La estructura del geonet tri-planar permanece estable incluso bajo las condiciones de presión normal muy alta sin punto de inflexión, mientras la mayoría de geonets bi-planares pueden colapsar o voltearse bajo la presión de 600 a 800 kPa. Para enfrentar los problemas de estabilidad estructural de un producto geonet bajo carga grande normal sostenida, Holtz, Christopher y Berg (1997)⁵ recomiendan limitar la carga sobre un geonet, bajo cualquiera de las siguientes, (a) la presión máxima sostenida en el nucleo a través de una prueba, con una duración mínima de 10,000 horas; o (b) la presión colapsante de un nucleo, definido por una prueba de carga rápida, dividida por un factor de seguridad de 5. La resistencia compresiva de 800 kpa mostrada en la Figura 1 sería equivalente a sólo 9 m de profundidad de la pila (sin considerar el peso del equipo de apilamiento y otros) asumiendo una densidad promedio de 1,700 kg/m³ y un factor de seguridad de 5 por carga. Técnicamente, un geonet bi-planar con resistencia compresiva tan baja no es conveniente como un medio de drenaje para la mayoría de las plataformas de lixiviación.

⁵ Holtz, R., Christopher, B. y Berg, R. (1997), Geosynthetic Engineering, BiTech Publisher, Canadá

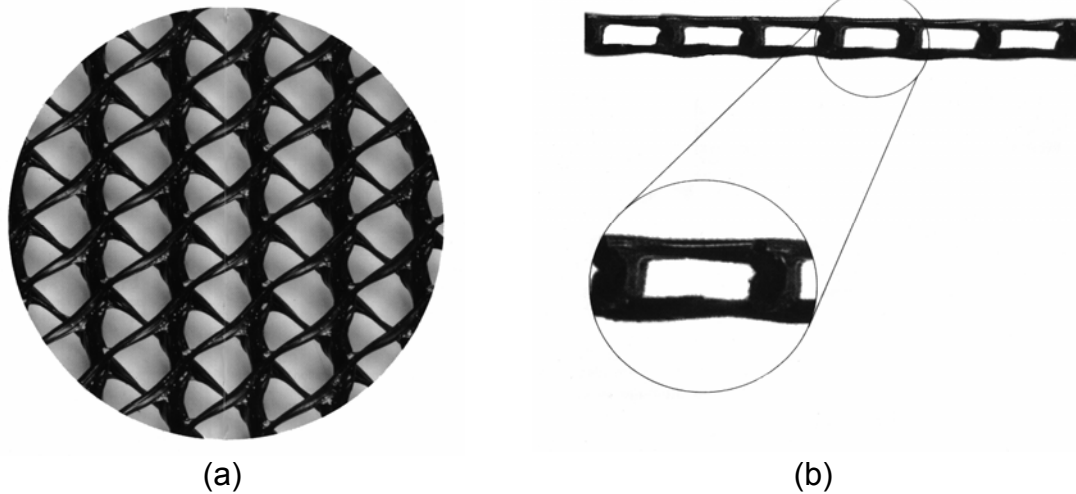


Foto. 2 Estructura de geonet tri-planar: (a) vista en planta, (b) sección transversal.

La Figura 2 presenta la transmisividad en-suelo de un geocompuesto tri-planar, medido bajo cargas normales y pendientes hidráulicas diferentes. La transmisividad disminuye con las cargas normales crecientes y aumenta con las pendientes de flujo decrecientes. La capacidad de flujo en-suelo del geocompuesto tri-planar excede la de otros geocompuestos, sobre todo bajo cargas normales pesadas. En las condiciones de lixiviación, la plataforma con mayor capacidad de flujo en-plano resulta en menor cantidad de tuberías de drenaje, una capa de protección más delgada, como también en una menor carga hidráulica sobre el revestimiento. Debido al tamaño de las plataformas de lixiviación típicas, esto puede resultar en reducciones significantes de las cantidades de tuberías y grava requeridas para la construcción.

Para el funcionamiento eficaz del geonet como una capa de drenaje lateral, el componente de filtro geotextil del geocompuesto debe diseñarse apropiadamente con el fin de prevenir la obstrucción o pérdida excesiva de finos del mineral lixiviado, y las ecuaciones empíricas son disponibles para poder evaluar el potencial de obstrucción. Además, se puede aplicar el ensayo de proporción de pendiente con el fin de evaluar un potencial de obstrucción de geotextil con respecto a un material de relleno específico⁶.

⁶ ASTM D5101, método de ensayo estándar para medir el potencial de obstrucción del sistema suelo-geotextil a través de la proporción de pendiente.

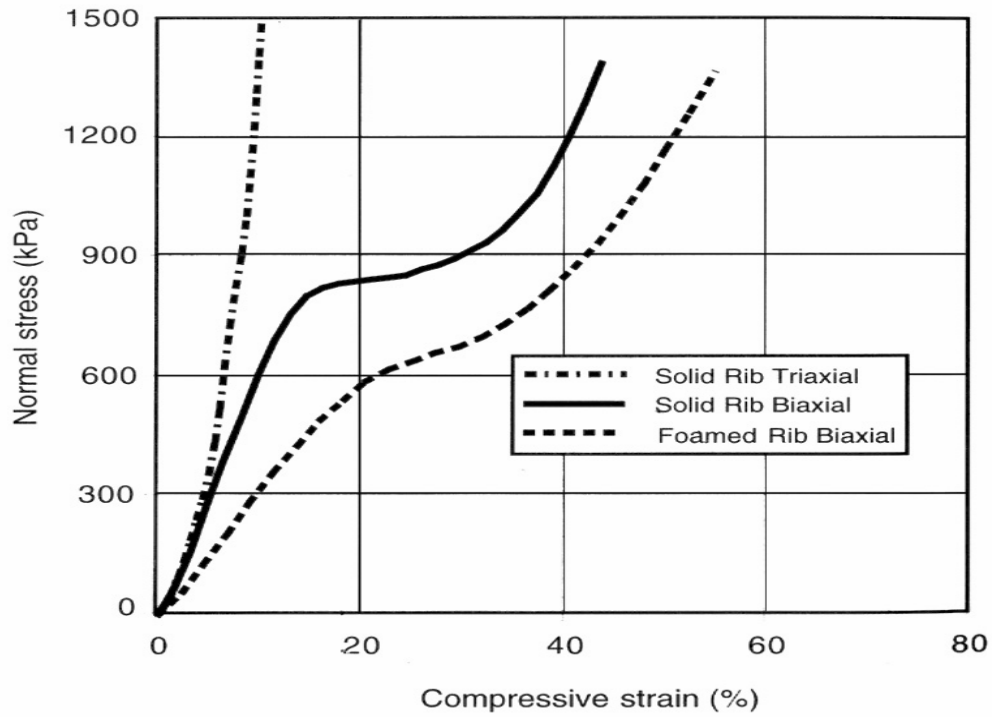


Figura 1. Datos de ensayo compresivo de diferentes geonets (según Koerner, 1998)⁷

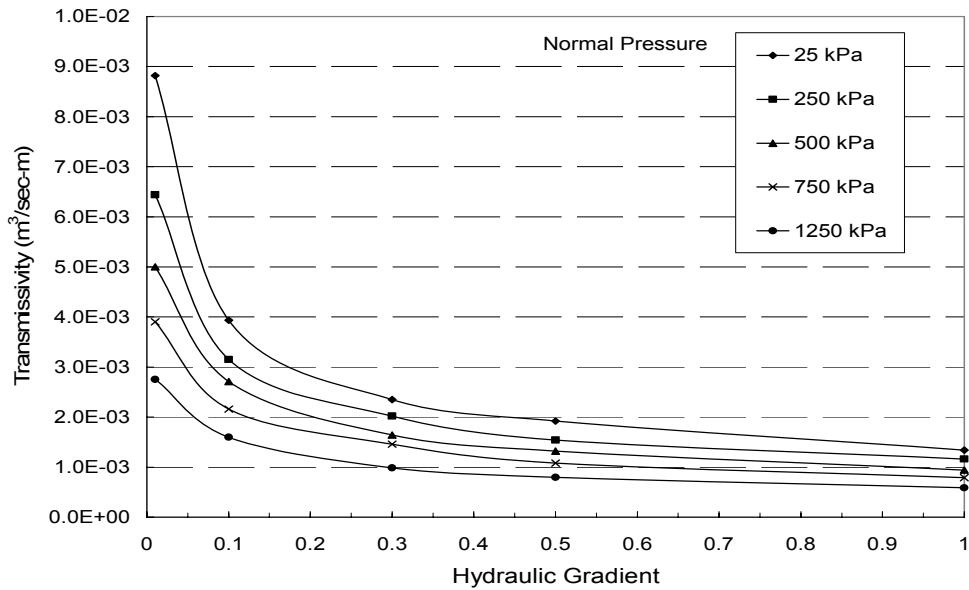


Figura 2. Resultados de ensayo de transmisividad en-suelo – geocompuesto tri-planar

⁷ Koerner, R.M. 1998, *Designing with Geosynthetics*, Prentice-Hall, New Jersey.

Descripción de Proyecto

Las instalaciones de una plataforma de lixiviación de cobre de tamaño mediano se planifican para un proyecto en la Amazona. Se consideró una pila dinámica debido a los factores metalúrgicos y los del clima (con el fin de minimizar el área de colección de lluvia). El diseño de la base consideró un revestimiento de LLDPE de 2.0 mm con un sistema de dos capas de protección (de drenaje y de operaciones) consistiendo la primera en 500 mm de roca chancada con un tamaño menor de 40 mm y la segunda en 1,000 mm de roca chancada de tamaño menor de 100mm. La pila de lixiviación es de aproximadamente 540 m por 1,200 m, con un total de 650,000 m². El mineral será transportado a un lado de la pila de lixiviación por una faja transportadora (por tierra) alimentando el tripper (la faja transportadora direccional), el bridge (la faja transportadora puente) y una serie de grass hoppers (las fajas transportadoras saltamonteses) ubicados a través de la pila. El apilamiento del mineral será realizado vía una apiladora radial instalada encima de la capa protectora. Para las operaciones de descarga se usarían cargadores frontales (tipo CAT 988 o 992I) y camiones de acarreo mineros (de una capacidad de 180 toneladas). Las cargas de ruedas de los camiones y cargadores, sobre todo cuando frenan o voltean, crean la carga de diseño estructural para la geomembrana y tuberías, como opuestas al peso estático de la pila, que es la carga de diseño típica para una pila convencional.



Foto 3: Acceso al proyecto demostrando suelos saprolíticos y vegetación densa típicos en las áreas amazónicas.

Acercamiento Alternativo

Se encontraron disponibles fuentes locales de roca dura, principalmente resultantes de la generación de roca estéril de mina, y el volumen de material necesario fue lo suficientemente grande para generar ahorros económicos a gran escala. Sin embargo, un factor crítico en los sitios de alta precipitación es la corta duración de la estación seca y la mayoría de la construcción debe

completarse durante la misma. En la Amazonía puede llover casi cada día del año, y la producción del volumen de roca chancada requerido para el proyecto tomaría aproximadamente 3 meses, consumiendo prácticamente la estación seca, lo cual deja un margen pequeño para cualquier error en el cronograma. Adicionalmente, cierta cantidad de grava se tendría que producir durante la estación de lluvia, elevando los costos y a la vez enfrentando los problemas de operación relacionados a los accesos, erosión y control de sedimentos. Debido a dichas limitaciones se consideraron modos alternativos de construcción de la capa protectora y se consideró la combinación de una sección de grava reducida con la red de drenaje geocompuesto. La Tabla 1 resume los cálculos comparativos para este estudio técnico y las ventajas de costos.



Foto 4: Vista aerea del sitio del proyecto y la cuenca de Amazona.

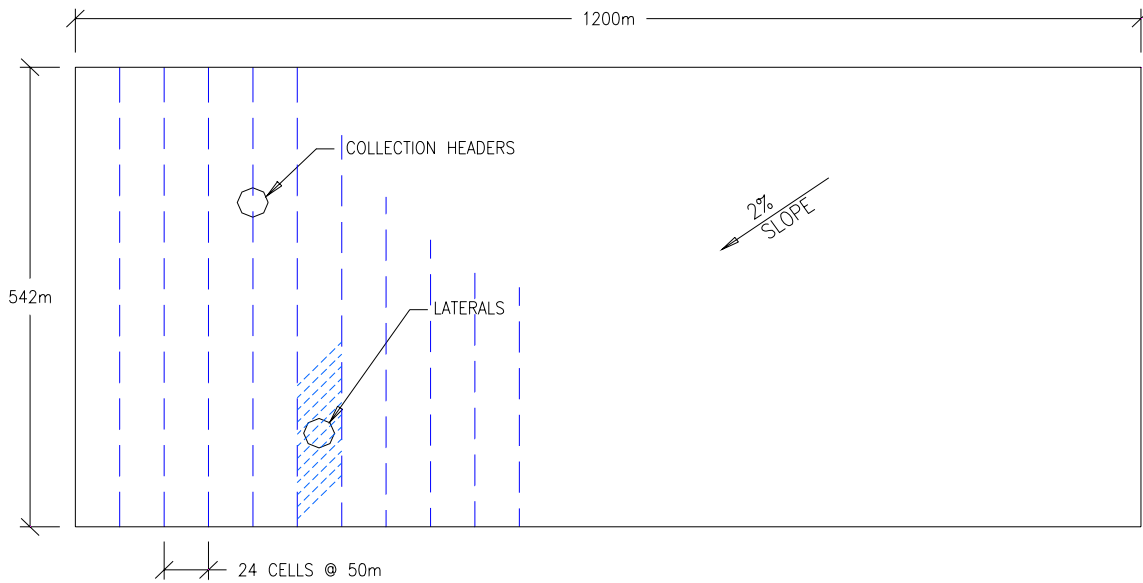


Figura 3: Vista en planta de la pila de lixiviación

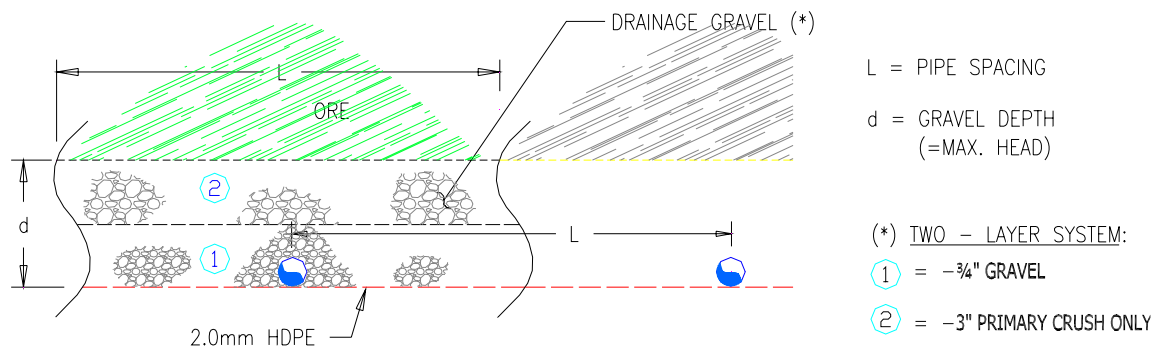


Figura 4: Sistema de Drenaje Convencional Demostrando la Capa Protectora

Tabla 1: Resumen de análisis de opciones convencional y de geonet

Sistema Convencional de Grava y de Tubería	Sistema Geocompuesto y de Tubería
Criterio de Diseño:	
(a) Tasa de Irrigación: tasa promedio de procesamiento de 9l/hora/m ³ , valor máximo de 15 l/hr/m ² con la concesión para lluvia	
(b) Permeabilidad de grava, $k = 5 \times 10^{-3}$ cm/sec	
(c) Trasmisividad de Geocompuesto, $T = 3.85 \times 10^{-3}$ m ² /sec	
(d) Profundidad máxima de pilas, $h = 10$ metros	
Hallar:	
(a) Espacio entre tuberías para la máxima carga hidráulica de 1.0 m sobre el revestimiento;	
(b) Diámetro de tubería (usando la tubería corrugada de doble pared/de pared interior lisa); y,	
(c) Profundidad de grava (igual a la máxima carga hidráulica, 1.0 m o menor según definido por control ambiental y convención de industria).	
Solución:	Solución:
Ver Figuras 3 y 4 para la vista en planta y sección transversal de la pila de lixiviación.	Ver Figuras 3 y 5 para la vista en planta y sección transversal de la pila de lixiviación.
Espacio entre tuberías de $L = 7$ m; hallado de ecuación elíptica de drenaje: $h_{max} = (L^2 \times r / 4K)^{0.5}$	Capacidad de geonet de transmitir el caudal a las tuberías laterales (usar Tendrain 5100-2 por Tenax)
Diámetro de tubería = 3 pulgadas de nominal (para 50% de caudal)	$Q_{tendrain}/\text{ancho de unidad} = (i) \times (T) = (.02) \times 3.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Carga máxima = 1.0 metros	$Q_{tendrain}/\text{ancho de unidad} = 0.28 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m-ancho}$
Profundidad de grava requerida = 1.0 m según lo siguiente: 500 mm de roca chancada y tamizada de 3/4 de pulgada, roca de desmonte sin finos 500 mm de roca de desmonte de la chancadora primaria	$Q_{actual} = 0.075 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m-ancho}$
	FOS para el flujo lateral = $0.28 / 0.075 = 3.7$ Por lo tanto, no se requiere grava para la carga hidráulica Control sólo para protección de punzamiento.
	Carga máxima = espesor de geonet $\ll 1.0$ m
	Verificar el diámetro de tubería: $Q_{pipe} = (15/1,000) \times 71\text{m} \times 10\text{m} = 10.65 \text{ m}^3/\text{hr}$ Tamaño de tubería requerido = 4 pulgadas de nominal (llena de 50%) Profundidad de grava requerida – controlada sólo para protección de geomembrana: Espesor mínimo factible para la construcción sobre el geonet = 300 mm
\$5,586,000 o \$8.60/m²	\$5,372,000 o \$8.30/m²

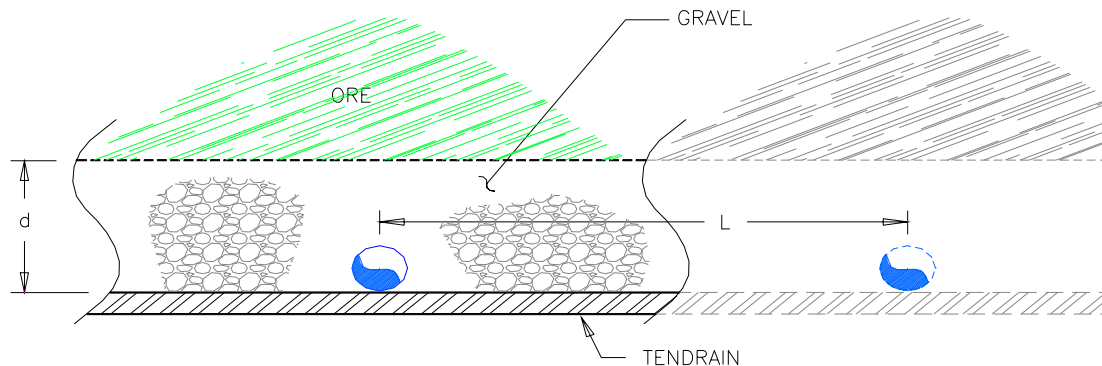


Figura 5: Capa de drenaje usando geonet tri-planar y capa protectora reducida

Posibilidades de Aplicación a Otras Operaciones

Los costos empleados en este ejemplo son típicos para muchos proyectos sudamericanos. La disponibilidad local de roca, durable y químicamente resistente varía de sitio a sitio; y, en algunos casos, tal material simplemente no está disponible. Adicionalmente, el proyecto considerado por el presente estudio se ubica en un país con tarifas de importación más altas de Sud America. Con todos los otros factores siendo iguales, la opción de emplear el geonet en un proyecto en Chile (por ejemplo) resultará en una economía más favorable.

La Tabla 2 resume algunos proyectos de pila de lixiviación recientes en América Latina, presentando la magnitud de los proyectos en consideración. Debido a constreñimientos locales de logísticas, movimiento de personal, materiales, el acceso al sitio, capacidad de producción de planta, disponibilidad del equipo de instalación, y las tasas de instalación máximas en cualquier sitio, varían desde 0.5 a 1.0 ha/día. De tal modo que los períodos de construcción/instalación de geomembrana, antes de considerar las obras de movimiento de tierras, colocación de la capa protectora y otros componentes de construcción, requieren un lapso de tiempo hasta de un año, con un promedio de 4 a 6 meses. La profundidad típica de la capa de drenaje y de operaciones de las pilas de lixiviación empleando un diseño agregado convencional es de 300 a 500 mm para las pilas convencionales y de 1,000 mm para las pilas on/off (dinámicas). Por lo tanto, una pila de lixiviación típica requiere 500,000m³ de grava chancada y tamizada, o de 100 a 200 días de producción, acarreo y colocación aproximadamente. Dichas actividades interfieren con la instalación de geomembrana, frecuentemente iniciadas previamente a la instalación de revestimiento y usualmente continuadas después de la instalación de la misma. Por lo tanto, las actividades de instalación de revestimiento y colocación de la capa protectora pueden demorar la mayor parte del año en un proyecto mayor, y

unos 6 meses en el caso de una pila de tamaño medio. Para los sitios con obras de movimientos de tierra complejos, tales como los proyectos de relleno de valle, se podrían requerir varios meses de trabajo antes de iniciar la instalación del revestimiento.

La mayoría de los proyectos presentados se ubican a gran altura en los Andes o en los trópicos, donde el tiempo de construcción se limita a la estación seca (de 3 a 5 meses). Por lo tanto, los diseños que reducen el tiempo de construcción tienen una ventaja adicional, reduciendo tanto el riesgo de atrasos como los costos de construcción de componentes, los cuales de otro modo requerirían instalación en la época difícil para las actividades de construcción.

Tabla 2: Plataformas de Lixiviación Planificadas y Recién Construidas en América Latina⁸

Ubicación	Tipo	Area de Plataforma ha	Revestimiento de Base	Profundidad de Mineral m
Argentina	Relleno de Valle	150	100 y 80 mil HDPE	130
Brasil	Convencional	119	80 mil HD o LLDPE	75
Chile	On/off	152	80 mil HDPE	10
	On/off	135	80 mil HDPE	10
	On/off	100	80 mil HDPE	10
	Botadero	95	60 mil HDPE	110
	Botadero	125	60 mil HDPE	125
	Convencional	200	80 mil LLDPE	145
	Convencional	130	30 y 40 mil PVC	75
Costa Rica	Convencional	15	60 mil HDPE	50
Perú	On/off	15	80 mil HDPE	10
	Valle	55	60 mil HDPE	85
	Valle	125	100 y 80 mil HDPE	135
	Valle	75	80 y 100 mil LLDPE	230*

(*) Sistema nuevo de base de revestimiento y drenaje para ser construido a altura media de las pilas.

Es importante admitir que el empleo de una capa de drenaje geocompuesta probablemente requeriría el uso de geomembrana de polietileno texturado

⁸ Thiel, R. y M.E. Smith, State of the Practice Review of Heap Leach Pad Design Issues, procedimientos de la reunión bi-anual del Instituto de Investigaciones de Geosintéticos, Las Vegas, Nevada, ESA, Diciembre 2003.

alrededor del perímetro en la zona de estabilidad con el fin de conservar la resistencia al corte de interfaz de geocompuesto/geomembrana. Dicho interfaz, tanto como el interfaz interior de geotextil-geonet en el mismo geocompuesto, necesitaría una evaluación en el contexto de requisitos de estabilidad estática y dinámica de talud según las especificaciones del sitio.

Una capa de grava se coloca directamente encima del geocompuesto de drenaje para la protección de la capa de geomembrana inferior. Un ensayo de campo de la pila podría ser requerido con el fin de asegurar que la capa de grava no causará daños al filtro del geotextil.

Conclusiones

Técnicamente, el geocompuesto de geonet tri-planar es conveniente para reemplazar la parte de grava de drenaje. La alternativa de drenaje de geonet presenta la ventaja de una reducción dramática de la carga encima de revestimiento. Los drenes de grava convencionales causan una carga de 1 m comparada a la de 7 mm correspondiente al diseño de geonet. Asumiendo que el tamaño y frecuencia de defectos son iguales, el empleo de geonet en el sistema de drenaje reducirá la tasa de filtración potencial por un factor de $(1.0/0.007)^{0.9} = 87$. Adicionalmente, el geonet proporciona una mejor protección de punzonamiento causado por daños de rutina, y reduce el riesgo de daños causados por construcción (como los cortes de plástico por un tractor) ya que habrá una sola capa que sera colocada encima del revestimiento la cual está separada por el geocompuesto (un nucleo de geonet laminado con dos geotextiles no tejidos de 250 g/m² en este caso). Desde que este tipo de daños produce un mayor potencial de filtraciones y daños serios al ambiente, la ventaja de reemplazo es enorme. A continuación, el espacio máximo aceptable entre las tuberías es de 10 m según la practica de HL (Plataforma de Lixiviación) convencional a base de los factores metalúrgicos, lo cual origina un factor de seguridad “escondido” a través de la instalación de una mayor cantidad de tuberías, requeridas en caso contrario.

Asimismo, el diseño alternativo de geocompuesto resultó en aproximadamente \$200,000 ahorrados para una pila de 65 ha según la estimación de costos para la capa de drenaje/protectora.