

Guía Ambiental para Proyectos de Lixiviación en Pilas

INTRODUCCIÓN

1. Objetivo y Alcance

El presente documento tiene como objetivo servir de guía en el desarrollo, construcción y operación de proyectos de lixiviación en el Perú. Asimismo, se deberá utilizar en el desarrollo de instalaciones de lixiviación tanto de cobre como de metales preciosos. El alcance de este documento incluye información acerca de las opciones de esquema de proyectos de lixiviación, hidrología superficial y balance de agua, locación de instalaciones de lixiviación, almacenamiento de soluciones de lixiviación, diseño y operaciones, monitoreo operativo y finalmente el cierre de las instalaciones de lixiviación.

Estos lineamientos se centran en los avances se centran en los avances técnicos actuales y las actividades necesarias para proteger la salud humana y el medio ambiente. En este aspecto, el almacenamiento de las soluciones de lixiviación y la estabilidad de las pilas son factores importantes mientras que algunas consideraciones operativas y de diseño metalúrgico tienen una importancia secundaria. Por ejemplo, los asuntos referentes al diseño de revestimientos de las capas impermeabilizadas, el tamaño y diseño de pozas y el cierre de la operación de lixiviación son esenciales en la protección del medio ambiente. Por el contrario, la selección de precipitación con polvo de zinc en comparación con la adsorción con carbón activado para la extracción de metales preciosos o la selección de un elemento orgánico específico en el proceso de extracción por solventes/electrodeposición (SX/EW) para cobre ha sido considerada de importancia secundaria en el desarrollo de estos lineamientos.

2. Desarrollo Histórico de la Tecnología de Lixiviación

La tecnología actual de lixiviación de metales preciosos se ha desarrollado ampliamente desde mediados de la década del 70, aunque los principios de lixiviación así como los de extracción de oro mediante cianuración tienen una larga historia. Sin embargo, es en los últimos 20 años que la lixiviación se ha desarrollado hasta llegar a ser un método eficiente para tratar el oro oxidado y los minerales de plata. Ha demostrado ser una forma efectiva para extraer metales preciosos de depósitos pequeños y poco profundo.

Al medio ambiente son más manejables. Una desventaja de la tecnología de lixiviación en pilas actualmente existente es la reducción potencial del porcentaje de extracción de metales que se obtiene del mineral en comparación con lo que sucedería con la lixiviación convencional (Potter, 1981; Hiskey, 1985; y Thorstad, 1987).

El principio real de la lixiviación en pilas tiene una larga historia, como se infirió anteriormente. Por ejemplo: las minas de Hungría reciclaban las soluciones que llevaban cobre a pilas de mineral de baja ley a mediados del siglo XVI (Hiskey, 1985) y los mineros españoles percolaban soluciones ácidas en grandes pilas de mineral oxidado de cobre en Río Tinto en 1752 aproximadamente. Alrededor del año 1900, las operaciones de lixiviación fueron empleando técnicas como los ciclos de lixiviación/reposo para maximizar la recuperación de cobre (Taylor and Whelan, 1942; Thorstad, 1987). La lixiviación de pilas y botaderos de cobre se practica actualmente a nivel mundial en el caso de minerales de baja ley. Adicionalmente, los productores de uranio han venido practicando la lixiviación en pilas mediante soluciones ácidas y alcalinas desde fines de la década del 50.

La extracción de oro mediante cianuración llegó a ser un proceso comercial a través del trabajo pionero de dos hermanos escoceses, los doctores Robert y William Forrest, conjuntamente con John S. MacArthur, químico autodidacta. Estos hombres, experimentando por años en un laboratorio casero en Escocia, buscaban encontrar un proceso mejorado para recuperar el oro de los minerales complejos (Von Michaelis, 1985). Tuvieron éxito en su búsqueda y en 1887 se les emitió la Patente Británica 14, 174. Posteriormente se emitieron las Patentes

Estadounidenses 403,202 y 418,137 para estos tres hombres en 1889 (Hiskey, 1985). El proceso que abarcaban estas patentes incluía la agitación de pulpa ante la presencia de aire, seguido de precipitación con polvo de zinc de la solución filtrada de oro y cianuro (Von Michaelis, 1985).

La lixiviación de minerales de metales preciosos empleando el proceso de cianuración fue inicialmente sugerida por la Dirección de Minas de EE.UU. en 1967 (Thorstad, 1987). La primera aplicación de lixiviación comercial se efectuó a fines de los años 60 por parte de Carlin Gold Mining Company al norte de Nevada (Hiskey, 1985).

Cortez Gold Mines inició la primera operación a gran escala a principios de los años 70 lixiviando dos millones de toneladas de oro de ley marginal (Thorstad, 1987).

A mediados de la década del 70, se perfeccionó la tecnología de lixiviación en pilas de oro con el fin de tratar depósitos arcillosos de baja ley. Las mejoras, tales como la lixiviación en pilas usando aglomeración, fueron puestas en marcha por el aumento de la exploración de depósitos de baja ley ya que el precio del oro aumentaba drásticamente. Muchos de los depósitos descubiertos no pudieron ser procesados mediante las técnicas convencionales de lixiviación porque las arcillas o finos generados durante la trituración impedían la percolación uniforme de la solución a través de las pilas de mineral (Heinen y otros, 1979; McClelland y Eisele, 1981; y McClelland y otros, 1983). La tecnología de lixiviación en pilas usando aglomeración es aplicable a la mayoría de minerales de oro y relaves de flotación.

Los resultados de las mejoras tecnológicas que se han producido a través de los años 70 y en los años 80 pueden apreciarse en los drásticos aumentos del nivel de producción. Para 1993, la producción de oro de la lixiviación en pilas había aumentado a más del 35 por ciento del total de la producción de oro en EE.UU. desde un estimado de 6% en 1979.

La lixiviación en pilas es una técnica muy antigua para extraer cobre. La primera operación registrada de cobre a gran escala mediante lixiviación fue en Río Tinto, España aproximadamente en 1752 (Taylor y Whelan, 1942).

Los antiguos en realidad pudieron haber utilizado alguna variación de lo que conocemos hoy para recuperar el cobre de las sales solubles. La lixiviación de botaderos de cobre en la parte occidental de EE.UU. se inició poco después del desarrollo de minas a tajo abierto a gran escala por Jackling en 1904 en Bingham Canyon. Todos los componentes necesarios estaban en posición de establecer un ciclo de lixiviación de cobre. Sin embargo, los esfuerzos serios para explotar la lixiviación de botaderos probablemente empezó en las décadas del 30 y 40.

Durante los últimos años, ha habido una tremenda expansión de la lixiviación de botaderos. En el Cuadro A.1 (a-c) (Hiskey, 1993) se presentan algunas notas históricas referentes a las minas de solución de cobre.

Algunas innovaciones técnicas en los últimos años han aumentado la importancia de la minería de soluciones como un proceso para la recuperación de cobre. Entre éstas se incluye:

avances en extracción por solventes/electrodeposición (SX/EW);

innovaciones en los procesos de curado con ácido y ácido férrico para los minerales oxidados y mixtos; y,

mejoras en la construcción de pilas y botaderos.

En 1992, Estados Unidos produjo un total de 1,76 millones de toneladas métricas de cobre. Durante 1992 aproximadamente el 30% de la producción estadounidense provenía de electrodeposición (esto es, 522 755 TM). Se calcula que para fines del presente siglo, aproximadamente el 40% de la producción primaria de cobre en EE.UU. provendrá de las operaciones de lixiviación.

La extracción por solventes ha cumplido una función importante en los intereses actuales de la hidrometalurgia de cobre. En general, las soluciones impuras relativamente diluidas y que

contienen cobre se producen en la etapa de lixiviación. La extracción por solventes facilita la producción de un electrolito rico y puro que puede dirigirse hacia la casa de tanques donde el cobre puede ser electrodepositado como cátodos de alta pureza. La extracción por solventes ha hecho posible la producción de cátodos electrodepositados de alta calidad que pueden competir directamente con cátodos electro-refinados. En el pasado, la precipitación con chatarra de hierro era el método de recuperación establecido, esta alternativa producía cobre impuro que requería fundición y una posterior refinación para obtener cobre. La extracción de solventes proporcionó la interfase entre la lixiviación y la recuperación final de metal (Hiskey, 1993).

3. Prácticas Actuales y Futuras de Lixiviación en Pilas en el Perú

La lixiviación en pilas se emplea en todo el Perú para la producción de metales preciosos y cobre. La lixiviación de metales preciosos se da principalmente en la parte central norteña del Perú. Mientras que la lixiviación de cobre se da principalmente en la parte sureña del país. Las instalaciones de lixiviación se encuentran ubicadas en diversos entornos climáticos y físicos. Se emplean técnicas de construcción de capas impermeabilizadas tanto expansivas como reutilizables.

Los avances tecnológicos peruanos en lixiviación en pilas se han centrado en la extracción metalúrgica. Las pruebas en pilas que evalúan tamaños de grano, ciclos de lixiviación y la concentración de lixiviantes, son comunes. La mayoría de minas de cobre en Perú emplean métodos de extracción tradicionales de molienda y de concentración para minerales de alta ley. Las técnicas de lixiviación en pilas brindan la oportunidad de extraer productos de los minerales de ley anteriormente marginales.

La lixiviación de metales preciosos en la región norteña central del Perú ha generado una fiebre de oro en nuestros días, donde se encuentran depósitos de oro diseminados a gran escala cerca de la superficie terrestre con poco o ningún «stripping». A pesar de que las técnicas de lixiviación en pilas actualmente se utilizan en varios lugares del Perú, éstas se ampliarán considerablemente en la siguiente década.

Entre los diversos aspectos ambientales que deben considerarse en el Perú a fin de lograr un futuro exitoso para las operaciones de lixiviación en pilas, se incluye:

La adecuada preparación de cimientos y construcción de revestimientos: Entre los actuales sistemas de revestimiento se incluyen geomembranas, asfalto y concreto.

La inadecuada preparación de los cimientos traerá como resultado un asentamiento diferencial comprometiendo la integridad de los revestimientos. La selección de los materiales de revestimiento apropiados también resulta importante.

Destoxificación o neutralización del mineral procesado: Hasta la fecha, en el Perú no se ha planificado ni practicado el cierre de minas, tampoco se ha tratado la estabilización química del mineral procesado luego de la lixiviación.

Contención de aguas pluviales: La mayoría de instalaciones no ha sido diseñada para contener soluciones de proceso y casos extremos de lluvias. Una pequeña operación de lixiviación de metales preciosos al norte de Perú ha cubierto los «pads» de lixiviación reutilizables con el fin de controlar el balance de agua de las instalaciones. Sin embargo, esta no es una alternativa para las grandes operaciones y, por consiguiente, resulta necesario una base de datos climáticos para obtener el diseño apropiado de las instalaciones.

Monitoreo ambiental: Generalmente no se practica el monitoreo de contención de lixiviantes o rezumadero de las pilas de mineral procesado.

PROYECTOS

Capítulo I. DISEÑO DE PROYECTOS DE LIXIVIACION EN PILAS Y BOTADEROS

1. Componentes de un Proyecto de Lixiviación

La Figura 1.1 muestra los componentes típicos de un proyecto de lixiviación. Aunque todos los proyectos tienen los mismos componentes, sus esquemas están determinados por condiciones específicas del lugar. Estos componentes son los mismos para las instalaciones de lixiviación de cobre y metales preciosos, aunque se ha creado distintas terminologías para identificar las pozas y otras instalaciones. Gran parte de la información contenida en esta sección ha sido obtenida de Dorey, Van Zyl y Kiel (1988).

Mina/Depósito de Minerales

El material que va a ser lixiviado en cualquier locación particular puede obtenerse de varias fuentes, tales como mineral recientemente minado, mineral de baja ley anteriormente almacenado, roca estéril mineralizada y/o residuos/relaves de flotación. Aunque cada una de estas fuentes se puede someter a lixiviación, la mayoría de proyectos de lixiviación en operación incluyen mineral recientemente minado extraído de minas a tajo abierto, siendo ésta la técnica más económica para el desarrollo de depósitos de baja ley y gran volumen.

Preparación del Mineral

La metalurgia del mineral dicta el método mediante el cual el mineral deberá ser pretratado antes de la lixiviación.

Como corolario, el pretratamiento también puede dictar el método y la configuración de la construcción y la operación en pilas. Dependiendo del complejo en el cual se aloja el metal, se requerirá que el mineral tenga un tamaño de partícula que permita el contacto con la solución y la disolución. El pretratamiento del mineral puede variar de nada (en el caso de minerales tal como salen de la mina) a trituración, de trituración a aglomeración, o únicamente aglomeración (en el caso de relaves o minerales de grano fino).

Los principales objetivos de la preparación del mineral para la lixiviación radican en producir un mineral suficientemente fino que permita el contacto de la solución con los metales y lograr un mineral suficientemente permeable y estable que permita una adecuada velocidad de percolación a través de la pila. Estos requerimientos pueden resultar contradictorios en algunos casos en los que los tamaños de lixiviación óptimos de mineral resultan en una pila con baja permeabilidad. La cantidad de esfuerzo y gastos incurridos en la preparación del mineral con frecuencia está relacionada directamente con el aspecto económico de la recuperación del metal. Por ejemplo: si el costo diferencial de la trituración de un tamaño grueso a uno más fino no es superado por el valor diferencial del aumento de recuperación, entonces no se garantizará una trituración más fina.

Pila y Capa Impermeabilizada

Cada instalación de lixiviación es única y el diseño de las pilas y capas impermeabilizadas requieren la combinación de varios factores influyentes. Entre éstos se incluye el tipo y origen del mineral, metalurgia, lixivabilidad, topografía del lugar, características geotécnicas y geohidrológicas del lugar, así como el clima del mismo. Actualmente, se utilizan tres métodos básicos de construcción y operación de pilas y capas impermeabilizadas, estos son: pilas de expansión permanente, la capa impermeabilizada reutilizable y la lixiviación tipo valle. Estas propuestas se discuten con mayor detalle posteriormente. Las pilas y las capas impermeabilizadas necesitan estar diseñadas de forma que sean estructuras estables que contendrán tanto el sólido como el lixiviado.

Cada uno de los tres tipos de construcción de pilas/capas impermeabilizadas requiere la consideración de distintos criterios en diseño y operación.

La colocación del mineral en las pilas puede realizarse mediante diversos métodos, dependiendo principalmente de la naturaleza del mineral. Los métodos varían desde descarga y nivelación con un bulldozer, hasta la colocación mediante cargadores frontales y el apilamiento con fajas transportadoras. Los principales criterios al seleccionar un método de

construcción de pilas consisten en limitar la estratificación, compactación y segregación de partículas así como evitar daños en el revestimiento durante la construcción.

Frecuentemente, se cuenta con pocas alternativas posibles para la instalación de pilas debido a impedimentos tales como distancia de transporte, estado del terreno o topografía. Las bases de las pilas deberán ser capaces de soportar las cargas aplicadas por las mismas, no sólo en términos de estabilidad, sino también en términos de asentamientos diferenciales a través de las pilas. Los asentamientos diferenciales pueden afectar negativamente el drenaje de las pilas y dañar el revestimiento y la capa impermeabilizada. En el caso de pilas tipo valle o lugares con topografía de pendientes empinadas, se deberá considerar en el diseño de las pilas la capacidad de los materiales de las bases y la interfase del revestimiento de los mismos para resistir los deslizamientos.

Los sistemas de revestimiento (revestimiento sintético) son necesarios principalmente para contener las soluciones de lixiviación dentro de la instalación, y aunque las regulaciones ambientales con frecuencia requieren redundancia en el diseño, se deberá escoger sistemas de revestimiento que cumplan con este objetivo de contención. Los sistemas de revestimiento de capas impermeabilizadas generalmente están compuestos por combinaciones de: revestimientos de membrana sintética, revestimientos naturales o naturales modificados, así como revestimientos naturales y sintéticos compuestos.

Aplicación de Soluciones/Recolección de Soluciones

La solución de lixiviación es transportada desde la poza de soluciones gastadas (término empleado en la lixiviación de metales preciosos) o de refinato (término empleado en la lixiviación de cobre) hacia las pilas a través de un sistema de tuberías. Generalmente, se requiere un sistema de bombeo que proporcione suficiente presión

para la aplicación de aspersores o riego por goteo del lixivante. El principal requerimiento es la distribución uniforme del lixivante. Las velocidades típicas de aplicación van de 0,003 a 0,005 gpm/pies² (0,007 a 0,01 3/hora/m²). Las velocidades de aplicación deberán resultar en un flujo no saturado de lixivante a través del material de pilas. El flujo de solución a través de las pilas es esencialmente vertical desde la superficie hasta la base de las mismas.

Generalmente, se coloca una capa de material permeable con o sin tuberías de drenaje directamente sobre el revestimiento antes de la construcción de pilas. El propósito de esta capa es proporcionar drenaje y también actuar como protección para el revestimiento durante la construcción de pilas.

Las soluciones de lixiviación cargadas se recolectan de las pilas a través del sistema de tuberías y/o una capa de recolección de lixivado de alta permeabilidad. Con frecuencia se utilizan las tuberías de drenaje perforadas que se encuentran en la capa de drenaje, ubicadas en la parte superior de la capa impermeabilizada, para promover la recolección de soluciones. Dichas tuberías ayudan a evitar el crecimiento de presión de agua libre en la capa impermeabilizada y, por lo tanto, ayudan a reducir el potencial de pérdidas por filtraciones y los impactos en la estabilidad de las pilas. Las tuberías de drenaje pueden conectarse directamente con un sistema de tuberías a la poza de solución cargada, o la solución puede ser transportada a través de un canal/zanja de recolección.

En el caso de las instalaciones de lixiviación en botaderos, la capa de alta permeabilidad formada por grandes rocas que se desplazan hacia abajo durante la construcción de los botaderos aumenta la recolección de lixivado al fondo del valle.

Contención de Solución de Lixiviación Cargada

La solución de lixiviación cargada (denominada «PLS» en la lixiviación de cobre) contiene los «valores de metal» y por lo tanto resulta económicamente imperativo que no se produzca ninguna fuga en la poza de solución cargada. Generalmente, se emplea un sistema de revestimiento similar al que se utiliza para la poza de solución gastada. Frecuentemente, se requiere un revestimiento de baja permeabilidad a fin de contener la solución con los valores

económicos así como eliminar el posible impacto ambiental causado por fugas de solución. Es práctica común colocar las pozas de solución gastada y las de solución cargada en forma adyacente entre sí. Esto confina los grandes volúmenes de solución en un área de la instalación y reduce los costos de construcción y de operación. La interconexión de las pozas también puede permitir que se cuente con el volumen de las pozas combinadas para casos extremos climáticos y de operación.

La poza de solución de lixiviación cargada está conectada directamente a las pilas. Como tal, tendrá lugar el drenaje de las pilas tanto del lixivante aplicado como de precipitación directa. En consecuencia, el diseño de las pozas requiere la inclusión de la hidrología del proyecto, es decir, tormentas.

En el caso de pilas diseñadas para retener soluciones como las lixivitaciones tipo valle, la solución cargada se almacena dentro del espacio entre las partículas de mineral. En este caso se requiere que los revestimientos y terraplenes de las pilas funcionen como estructuras retenedoras de agua. La solución para el procesamiento o reciclaje en las pilas se extrae mediante bombeo de los sumideros dentro de las pilas.

En general, la práctica industrial estándar para la lixiviación de botaderos consiste en construir un terraplén térreo de concreto o de arcilla varios pies en el suelo rocoso gradiente descendente de la instalación de lixiviación del botadero. Dicho terraplén sirve para contener el PLS en una poza de solución. La práctica habitual ha consistido en no revestir la poza de solución. El área de contención detrás del terraplén también podría contener una capa de sedimentos de la escorrentía del botadero que actúa como un revestimiento de baja permeabilidad. Las investigaciones y diseño cuidadosos resultan necesarios a fin de proporcionar un alto nivel de contención para dichas instalaciones. Las condiciones geotécnicas y geohidrológicas específicas del lugar controlan si se debe revestir la instalación de la lixiviación del botadero y las pozas PLS.

Circuito de Recuperación del Metal

La recuperación de metales preciosos puede realizarse mediante un proceso de precipitación con polvo de zinc (proceso de Merrill-Crowe) o mediante la adsorción con carbón activado. También se incluye las etapas de electrodeposición y fundición. En el caso de lixiviación de cobre se utiliza la extracción de solventes (SX) seguido de electrodeposición (EW) para la extracción de metales. La elaboración de procesos de recuperación de metal escapa al ámbito de estos lineamientos.

Contención de Solución Gastada

La poza de soluciones gastadas o de rafinato, al igual que la poza de soluciones cargadas, deben tener un revestimiento de baja permeabilidad para fines de contención. La solución debe ser contenida por motivos económicos (ajuste químico, ajuste del agua, etc.), y para minimizar los posibles riesgos ambientales ocasionados por las fugas de solución. Se han utilizado otras contenciones tales como los tanques; sin embargo, dichas alternativas generalmente son más apropiadas para pequeñas operaciones donde los volúmenes de solución no son grandes.

LOCACIONES

Capítulo III. LOCACIONES DE LIXIVIACION EN PILAS

La selección de áreas para capas impermeabilizadas de lixiviación, pozas de recolección y planta de recuperación frecuentemente es una elección obvia. El proceso de selección del área generalmente es producto del buen criterio y sentido común. En el caso de un proyecto particular, una locación puede ser la única disponible u otra locación puede ser evidentemente mejor que las otras locaciones. En el caso de otros proyectos pueden encontrarse disponibles varias locaciones y no es fácilmente visible la locación a elegir.

Probablemente se tenga que seguir un proceso formal para la selección de locaciones. Generalmente consiste en la delimitación del área de interés, la identificación de la locación y detecciones empleando criterios específicos y finalmente la evaluación de la locación. La clasificación cualitativa o cuantitativa puede utilizarse para seleccionar la alternativa preferida. Ejemplos de la selección de locaciones los proporcionan Robertson y otros (1980) y Crouch and Poulter (1985).

1. Caracterización de la Locación

El objetivo de la caracterización de locaciones consiste en identificar y evaluar las condiciones de los cimientos y los materiales, las condiciones geohidrológicas de la locación y la disponibilidad de materiales prestados.

En general, se realizará una investigación geotécnica de la locación para un proyecto de lixiviación en pila con el fin de recabar la siguiente información:

Las condiciones de los cimientos más allá de las edificaciones, pilas y otras áreas en las que se añade más carga para cambiar las condiciones de tensión en las rocas y subsuelos existentes.

Las condiciones de excavación, o con cuánta facilidad se puede excavar y retirar materiales en áreas donde se requieren cortes.

La calidad y la cantidad de posibles materiales de construcción disponibles para revestimientos, materiales de drenaje y relleno estructural.

Los peligros relacionados con la locación, tales como fallas recientes o activas, condiciones subterráneas inaceptables o suelos suaves o colapsibles.

La identificación general de las condiciones geológicas y geohidrológicas más allá de las estructuras tales como las pozas de recolección y capas impermeabilizadas de lixiviación.

El trabajo de investigación de la locación generalmente es adaptado con el fin de obtener los mejores resultados de los equipos y recursos disponibles. En el caso de una instalación de lixiviación, la investigación de la locación incluye una o más de las siguientes tareas:

Observación y reconocimiento de la superficie.

Investigación subterránea (mediante exposiciones, orificios de mina, canales hechos con bulldozer o con retroexcavadora).

Recolección de muestras.

Pruebas de muestras.

Se requiere la recolección y las pruebas de las muestras con el fin de caracterizar los posibles materiales de construcción yacimientos.

El campo de aplicación y los detalles de un programa de investigación del lugar dependerá de:

El tamaño de las pilas y estructuras implicadas.

La etapa en que se encuentre el proyecto (diseño final o factibilidad).

Las condiciones del subsuelo (si la locación se encuentra sobre arcilla suave o roca competente)

El tipo de materiales de construcción con que se cuenta (si se cuenta o no con materiales de revestimiento del suelo).

Las investigaciones poco profundas se realizan mejor en los canales hechos por retroexcavadoras (o por bulldozer). Estas permiten la inspección visual del subsuelo y la facilidad de las muestras para las pruebas de laboratorio. Los canales son generalmente efectivos en una profundidad de aproximadamente 3 metros, o según las condiciones de la locación tengan en cuenta la seguridad dentro del canal.

Las perforaciones y el muestreo (tales como pruebas estándar de penetración, muestreo continuo o toma de muestras) se llevan a cabo en el lugar donde el material que va a ser investigado está a una profundidad mayor que la que se puede alcanzar con una

retroexcavadora. Esto frecuentemente es necesario cuando los materiales de los cimientos son débiles en profundidad, o cuando se consideran las excavaciones profundas. La perforación se efectúa en caso de investigaciones hidrológicas si la profundidad, o el potencial del impacto, del agua subterránea es importante. Se utilizan métodos especializados de investigación de locación (tales como las pruebas Dutch o piezocónicas, la refracción sísmica, los registros geofísicos y las pruebas de estabilidad de corte) en áreas con inusuales condiciones de cimientos y donde las técnicas más comúnmente empleadas no proporcionen una información adecuada para la caracterización del lugar.

En textos geotécnicos tales como Clayton y otros (1982), Holtz y Kovacs (1982), Hunt (1986) y Lowe y Zaccheo (1991) se encuentra mayor información acerca de investigación de locaciones con fines geotécnicos.

2. Caracterización de la Ganga

El objetivo de la caracterización de la ganga consiste en identificar los constituyentes que puedan ocasionar impactos en la calidad del agua durante las operaciones y luego de la clausura si se descargan desde la instalación.

Durante la localización y la evaluación inicial de una instalación de lixiviación, es necesario obtener información acerca de las características del mineral y la ganga, y calcular la posible cantidad de lixiviado del material durante y luego de las operaciones.

Después de la clausura, es más probable que sea necesario permitir la descarga desde la instalación hacia el medio ambiente y, por lo tanto, la caracterización del mineral procesado es necesaria para diseñar la clausura.

Deberá evaluarse en esta etapa del proyecto el potencial de generación de ácido y la posterior descarga de metales pesados y acidez del mineral procesado y ganga. En caso de un efluente procesado con alto pH, provenientes por ejemplo, de mineral de metales preciosos procesado, se pueden liberar algunos metales como el arsénico. Escapa al campo de aplicación de la presente guía proporcionar una completa discusión de los estudios de caracterización y el resto de esta sección analizará brevemente algunas de las pruebas que se han utilizado para caracterizar los sólidos.

Existe una diferencia entre el comportamiento a largo plazo de los minerales oxidados y los sulfurados en la lixiviación en pilas de cobre. En el caso de minerales oxidados, se deberá utilizar ácido en el proceso de lixiviación, mientras que en el caso de los minerales sulfurados, usualmente se genera suficiente ácido cuando la lixiviación se está llevando a cabo en condiciones de estado constante. Por consiguiente, es posible que a largo plazo se pueda lavar el ácido de un mineral oxidado procesado, pero sería imposible hacerlo con un mineral sulfurado. Por lo tanto, deberá hacerse una distinción entre óxidos y sulfuros y deberá recolectarse información para evaluar la posible generación de ácido a largo plazo.

Las pruebas de caracterización de ganga generalmente consisten en una contabilidad de la base de ácido, pruebas de lixiviación y celdas de humedad. En resumen, el propósito de la prueba de contabilidad de la base de ácido consiste en identificar materiales potencialmente generadores de ácido y no generadores de ácido. Las muestras seleccionadas luego serán remitidas para la prueba de celdas de humedad. En esta prueba, el aire húmedo pasa a través de la muestra y la muestra es lavada semanalmente para evaluar la generación de constituyentes como el sulfato, hierro y pH que pueden indicar la formación de ácido. La prueba de celda de humedad generalmente se efectúa durante un período de veinte semanas. Las pruebas de lixiviación pueden llevarse a cabo a fin de evaluar el comportamiento de un material bajo diversas condiciones, por ejemplo, la lixiviación de material con soluciones ácidas específicas para modelar los efectos de la precipitación. Nevada ha utilizado ampliamente la prueba de movilidad del agua meteórica. En el Cuadro 3.1 se proporciona el procedimiento de la prueba de movilidad del agua meteórica.

3. Peligros Geológicos

Durante la localización de las instalaciones, es importante identificar y evaluar los peligros geológicos (tales como desprendimiento de tierras, fallas activas, etc.) que podrían tener un impacto sobre la integridad de las estructuras e instalaciones que contienen las soluciones del proceso. Dichas instalaciones incluyen la capa impermeabilizada de lixiviación así como las pozas y la planta del proceso.

Los peligros geológicos pueden ejercer un impacto significativo sobre la estabilidad de algunas instalaciones. Existen ejemplos de instalaciones que fueron construidas sobre desprendimientos de tierras históricos que no se identificaron en ese momento. Con mucha frecuencia dichos desprendimientos se pueden reactivar ocasionando grandes deslizamientos que pueden dañar la integridad de los sistemas de contención. Entre otros peligros geológicos se incluyen las avalanchas.

Uno de los peligros geológicos más comunes y graves en las regiones Costa y Sierra del Perú son los flujos de desechos que se desplazan rápidamente o los flujos de lodo denominados huaycos, que se presentan en lavados secos o quebradas. Marticorena (1991) describe varios huaycos destructivos recientes, incluyendo uno en 1981 que represó el Río Rímac sobre Lima. Sin ir muy lejos, un huayco en 1983 destruyó dos pequeñas instalaciones de lixiviación en pila que habían sido construidas a través en una quebrada. Las áreas susceptibles a sufrir huaycos pueden identificarse desde la naturaleza distintamente estratificada de los depósitos de desechos en exposiciones o pozas de prueba en la zona de descarga. Dichas exposiciones sugieren que en muchas quebradas, los huaycos pueden ser más frecuentes que las inundaciones reales, con desechos generados en elevaciones mayores por escorrentía que nunca llegan al fondo de la quebrada como agua. No existen medidas de ingeniería que puedan tomarse para proteger una instalación de lixiviación en pila contra los efectos de los huaycos, y deberá identificarse y evitarse las áreas potencialmente afectadas durante los estudios de locación.

Los métodos sensores remotos como la interpretación aerofotográfica resultan útiles al analizar las condiciones generales del lugar e identificar el potencial de la existencia de peligros geológicos. También deberá efectuarse el reconocimiento del lugar por parte de un ingeniero geólogo experimentado con el fin de identificar las características específicas del lugar.

Cuadro 3.1 PROCEDIMIENTO DE MOVILIDAD DEL AGUA METEORICA

Recolectar una muestra representativa del material. El tamaño mínimo de la muestra para este procedimiento es de 5 kilogramos. Si el material del que se va a extraer una muestra tiene tamaños de partícula mayores de 5 centímetros, deberá clasificarse suficiente material para proporcionar suficiente material para proporcionar 5 kilogramos de muestra con un tamaño máximo de partícula menor de 5 centímetros. Esta muestra clasificada se coloca en un dispositivo de extracción que permite que la muestra sea humedecida continuamente por la circulación del agua meteórica sintética (lixivante). El volumen del agua meteórica sintética deberá equivaler en peso al peso de la muestra clasificada más el volumen adicional necesario para saturar la muestra. Se hace circular, se agita o mezcla el lixivante durante 24 horas, humedeciendo continuamente la superficie completa de la muestra. Para este procedimiento, el lixivante es agua graduada en laboratorio cuya actividad en iones de hidrógeno (pH) ha sido ajustada entre pH 5,5 y 6,0 con ácido nítrico de grado reactivo antes de cargar el dispositivo de extracción. No se requiere un posterior ajuste del pH durante la extracción. Una hora después de dejar circular, se decantará y preparará una muestra del lixivante para análisis. Se realizará el análisis de los constituyentes que figurarán al final de este procedimiento. Los elementos para los cuales se ha establecido un estándar tendrán un menor nivel de cuantificación igual o menor que el estándar.

El dispositivo de extracción podrá ser una columna empacada con un pequeño depósito de reciclaje o rollo de botella o barril grande acoplado a la circulación/agitación interna o su equivalente.

La información que se registrará y reportará es la siguiente:

El procedimiento utilizado para recolectar una muestra representativa;
El pH ajustado del lixiviante original;
El pH final de fluido luego de la mezcla;
Porcentaje de muestra que pasa la malla 200;
Peso total de la muestra sólida;
Humedad requerida para saturar la muestra;
Tiempo de contacto en el dispositivo de extracción;
Síntesis de la técnica y equipos utilizados para lixiviar la muestra, es decir, columna, lote, etc.; y,
Resultados del análisis del lixiviante luego de finalizar la extracción.

Alcalinidad Galio Escadio

Aluminio Hierro Selenio

Antimonio Plomo Plata

Arsénico Litio Sodio

Bario Magnesio Estroncio

Berilio Manganeso Sulfato

Bismuto Mercurio Talio

Cadmio Molibdeno Estaño

Calcio Níquel Titanio

Cloruro Nitrato Total sólidos disueltos

Cromo pH Vanadio

Cobalto Fósforo Cianuro WAD*

Cobre Potasio Zinc

Fluoruro

*Cuando sea apropiado

HIDROLOGÍA

Capítulo II. HIDROLOGIA SUPERFICIAL Y BALANCE DE AGUA

Las consideraciones sobre hidrología superficial y balance de agua son específicas del lugar. La ubicación del lugar determina las condiciones climáticas mientras que la disposición del lugar determina la necesidad de una desviación del agua superficial u otras opciones para el manejo del agua. Generalmente es muy difícil diseñar sistemas confiables de manejo de agua en base a las informaciones climáticas específicas del lugar y a corto plazo. Deberán hacerse estimados de los datos climáticos que se utilizarán en el diseño en base a las informaciones regionales.

Esta sección proporciona una revisión de la fisiografía y del clima de Perú. Gran parte de esta información se obtuvo de Vick (1994). Los estudios sobre hidrología superficial y balance de agua se han extraído de Hutchinson (1988) así como la experiencia en cuanto a operaciones de lixiviación en pila en EE.UU. durante la década pasada.

1. Fisiografía y Clima del Perú

Las características geográficas del Perú están entre las más variadas de cualquier país del mundo y pueden afectar profundamente el desarrollo de esquemas y diseños de proyectos de lixiviación en pila. El país puede dividirse en varias provincias fisiográficas, como se muestra en la Figura 2.1.

La zona costera se extiende a lo largo del país desde el Océano Pacífico hasta aproximadamente 50-100 kms tierra adentro donde los Andes se elevan drásticamente hasta alturas que sobrepasan los 6000 m. La actividad minera en esta zona está favorecida por su relativa accesibilidad al transporte oceánico y por carretera. En la región Sierra o Andina se ha localizado gran parte de la actividad minera (algunas a alturas por encima de los 5000 m.), cuyas extensiones abarcan la Cordillera Occidental y Central y las elevadas mesetas del Altiplano hasta el sur. Dichas extensiones principales que contienen varios volcanes activos y recientemente activos, están dominadas por características glaciales y periglaciales en las alturas más elevadas, con valles y cuencas empinados. El desarrollo de instalaciones de lixiviación en pila en estas características topográficas puede resultar muy difícil.

Más al este, los Andes descienden hasta los bosques de la Selva Alta a alturas que oscilan entre 400 y 1000 m., y finalmente hasta las selvas tropicales de la Selva Baja o Llano amazónico. La Selva Alta contiene varias minas más pequeñas existentes, mientras que la actividad minera en la Selva Baja se limita actualmente a pequeños lavaderos de oro y operaciones de draga. Sin caminos, el transporte se limita sólo a aire y ríos.

Los factores climáticos afectan el manejo de lixiviación de pilas en formas importantes. La evaporación, precipitación pluvial y deshielo de la nieve controlan el balance hídrico y los requerimientos extremos de inundación para los trabajos de desviación. Las características climáticas del Perú pueden variar en una escala incluso más amplia que las características fisiográficas. De acuerdo con un esquema de clasificación climática 8 de los 11 distintos tipos de clima en el mundo se encuentran en el Perú.

El clima a lo largo de la costa está dominado por los efectos actuales del océano. Directamente el litoral es una franja de agua anormalmente fría para la latitud, y aunque está relacionado con la Corriente Peruana o Corriente Humboldt que fluye hacia el norte, la franja de agua fría realmente consiste en agua emergente de las capas profundas en el océano. Este litoral de agua fría brinda tal estabilidad a las condiciones atmosféricas que las precipitaciones pluviales son ligeras o no las hay. No obstante, al mismo tiempo, desde junio hasta octubre en invierno hay un fuerte desarrollo de nubosidad baja o una fina capa de neblina (garúa) que bloquea la luz solar y retarda la evaporación. Por ejemplo, Lima tiene una precipitación anual promedio de sólo aproximadamente 5 cms con cubierta nubosa durante el 70% del año, con cifras similares de 3 cms y un 60% en Tacna al sur (Meigs, 1966). En la Figura 2.2 se muestra el desierto de la costa peruana, junto con la zona árida que se extiende tierra adentro en una distancia de 30 a 50 kms a excepción de una expansión hacia el este al sur del Altiplano. Aquí esta zona es contigua al desierto de Atacama, el desierto costero más seco del mundo donde las lluvias pueden caer en intervalos de muchas décadas y no basta para mantener cualquier vegetación hasta elevaciones máximas de 2500 m. sobre las pendientes de los Andes.

Los efectos del océano también controlan la extrema precipitación en esta región. La contracorriente caliente El Niño aparece anualmente desde el norte, pero ocasionalmente en intervalos de siete o más años avanza más al sur. Esta agua caliente en el litoral produce inestabilidades atmosféricas que traen como resultado precipitaciones torrenciales e inundaciones incluso en áreas que no tenían precipitación pluvial durante un año. Por ejemplo, durante uno de los peores años de El Niño en 1925, Lima experimentó precipitaciones de 152 cms, 30 veces más que el promedio anual, y la costa norteña tuvo más precipitaciones que todo el período anterior de 10 años (Meigs, 1966). Esto muestra claramente que los prolongados intervalos entre precipitaciones no garantiza la ausencia de una intensa precipitación que puede afectar las capacidades necesarias para las pozas de lixiviación.

En otras partes del país, los mismos efectos de El Niño que producen una periódica precipitación intensa en la región Costa producen efectos similares en la Selva y sequía en la Sierra. Sin embargo, por lo general, se mantiene el clima tropical y subtropical en las partes norte y centro de la Selva debido a una zona de convergencia de baja presión, con una precipitación anual de 3000-4000 mm. En la Sierra, las condiciones generalmente son semi-áridas, aunque la lluvia y la nieve son controladas en gran parte por la elevación y los efectos orográficos. La precipitación anual promedio en la Sierra va desde aproximadamente 300 mms en el sur hasta 900 mms en el norte, con nieve por encima de los 3500 m. de elevación.

Los datos meteorológicos en Perú son muy limitados, rara vez registran más de 30-40 años en cualquier estación. Se tiene informes de que se instalaron 700 estaciones entre 1960 y 1964 con fondos de las Naciones Unidas, y para 1980 se dice que existían 934 estaciones (526 de precipitaciones y 408 climatológicas). No obstante, desde esa época la falta de mantenimiento y personal han limitado las actividades en esta área, y no se sabe cuántas estaciones sobreviven ni si los datos son confiables. Como consecuencia, generalmente hay una gran incertidumbre en los parámetros de balance hídrico y el cálculo de inundación extrema para fines de diseño de pozas y desviación.

Tomando como base la información disponible, la Figura 2.3 resume la precipitación anual promedio en el Perú, y el Cuadro 2.1 ofrece algunos estimados muy generalizados sobre la evapotranspiración y precipitación anual promedio.

2. Hidrología Superficial

Existen dos tipos de procesos de escorrentía de precipitación que resultan importantes al diseñar instalaciones de lixiviación en pila. El primero es un caso intenso, a corto plazo, de precipitación intensa o deshielo de nieve que ocurre en un período de unos cuantos minutos u horas, provocando inundaciones que pueden provocar daños de erosión y rebose de las pozas y diques de contención. Entre los problemas específicos que pueden presentarse durante estos casos se incluye:

- Arrastre por agua de los caminos de acceso.

- Daños en los diques de contención.

- Dilución con el agua de inundación de la solución de lixiviación.

- Daños en las pozas de solución de lixiviación por la erosión perimétrica o rebose y erosión.

- Pérdida de fluido del circuito de proceso debido a roturas en los diques de contención o pozas de solución de lixiviación.

- Erosión de las pilas y la consiguiente contaminación de la solución de lixiviación con sedimentos.

Otros tipos de procesos de escorrentía de precipitación que podrían ocasionar problemas son los períodos húmedos o secos a largo plazo (generalmente meses). La ampliación de los períodos húmedos pueden ocasionar que se acumule el fluido del proceso, aumentando el riesgo de rebose de las pozas. Los períodos secos reducen la cantidad de agua de proceso mediante la evaporación y pueden ocasionar la conformación de escasez de agua si no se puede contar fácilmente con adecuados suministros de agua dulce. La precipitación es un elemento clave al determinar la proporción de acumulación de agua durante acontecimientos a corto plazo. Se puede contar con métodos hidrológicos que deriven casos de 24 horas durante diversos períodos de retorno si existen suficientes datos climáticos.

Generalmente, para la mayoría de instalaciones de interés (como la capa impermeabilizada de lixiviación y las pozas de solución madre y gastada), el total de precipitación del diseño simplemente puede utilizarse tal cual o puede multiplicarse por el área afectada para producir el volumen requerido. Aquí se asume que no hay pérdidas.

En algunos casos, como en los que la precipitación se recolecta en un área de sedimentación natural del suelo, es más preciso determinar los valores de precipitación excedentes que toman en cuenta las pérdidas de infiltración. El Manual SCS sobre Hidrología (Servicio de Conservación de Suelos, Departamento de Comercio de EE.UU., 1972) describe cómo se

efectúa esto. Implica determinar una clasificación de tipos de suelo (Cuadro 2.2) y un apropiado número de curva de escorrentía (Cuadro 2.3) y, por consiguiente, la precipitación excedente total (Figuras 2.4 y 2.5). Puesto que estas técnicas hidrológicas se desarrollaron con fines agrícolas, las categorías enumeradas en el Cuadro 2.3 no son adecuadas idealmente para una locación minera.

La evaporación de las superficies de agua abiertas, las pérdidas por aspersion y la evapotranspiración contribuyen a las pérdidas de agua de una pila. Se requieren estimados cuantitativos de las tasas anuales para evaluar el balance de agua general. En los casos en que las fluctuaciones estacionales en el volumen de agua del circuito sean importantes, quizás se requiera estimados mensuales.

La evaporación de las superficies de agua abiertas pueden obtenerse a partir de los datos de bandeja Clase A disponibles en la proximidad del proyecto. Un factor típico de conversión para calcular la evaporación de pozas grandes (por ej.: pozas madres) a partir de datos de bandeja es 0,75. Los datos de la evaporación mensual promedio generalmente se obtienen de las mismas fuentes que los datos de precipitación.

Las pérdidas por aspersion dependen en gran medida del tamaño de las gotas, temperatura, humedad y velocidad del viento.

Las pérdidas son de dos tipos: sopladas por el viento y evaporadas. Generalmente las pérdidas por aspersion sopladas por el viento deberán minimizarse mediante el empleo de gotas grandes, es decir diámetros de boquilla grandes con presiones bajas, y mediante la no aspersion durante los vientos fuertes.

Las pérdidas por evaporación de las pilas con irrigación por goteo generalmente son muy reducidas. Generalmente se requiere la experiencia local para calcular este valor con precisión.

Cartas Hidrográficas de Inundaciones

En algunos casos, es importante calcular la velocidad máxima de escorrentía de la inundación, es decir la velocidad máxima de flujo. Este cálculo es necesario para dimensionar las instalaciones de transporte de agua de inundación, tales como alcantarillas en los caminos o zanjas de desviación alrededor de la operación de lixiviación en pila.

Existen dos enfoques para este tema. El primero es un enfoque simple pero crudo, denominado Fórmula Racional. Chow (1964) lo describe y lo resumimos aquí. Aunque es sólo aproximado, este método generalmente es adecuado como una herramienta de diseño para sedimentaciones más pequeñas (menos de 5-10 acres). En muchos casos, el tamaño real de la zanja desarrollada con este método está determinado por la construcción que se utilizará y sobrepasa los requerimientos de diseño.

Este enfoque generalmente implica la determinación de un tiempo de concentración (T_c) para el estanque que está siendo estudiado. Este término se define como el tiempo que requiere una gota de agua que cae de la parte más remota del estanque para llegar al punto de interés. Puede determinarse mediante la siguiente ecuación (Chow, 1964).

$$T_c = 0,00013 L^{0,77}/S^{0,385} \text{ horas}$$

donde:

L = longitud del área del estanque en pies medida en el curso de agua más largo.

S = pendiente promedio del estanque como una proporción sin dimensiones.

Una vez que se conoce el tiempo de concentración, se determina la cantidad máxima de precipitación que puede caer en ese período de tiempo mediante los procedimientos que se señalaron anteriormente. Luego se evalúa el máximo de inundación apropiado mediante la siguiente ecuación:

$$Q = C \cdot i \cdot A$$

donde:

Q = inundación máxima del diseño en cfs (1 cfs = 0,2832 m³/seg).

C = coeficiente máximo de escorrentía - descrito en la Tabla 3.4.

i = intensidad de la precipitación en pulgadas/hora = Pc/Tc.

Pc = diseño/precipitación en pulgadas en tiempo Tc.

Tc = tiempo de concentración en fracciones de una hora.

A = área de sedimentación en acres.

Un método más preciso es el denominado técnica gráfica unitaria de SCS. Se describe en Diseño de Pequeñas Represas (USBR, 1977) y en el Manual sobre Hidrología de SCS (1972), que pueden conseguirse en el mercado. Puede utilizarse para sedimentaciones mayores de 5 a 10 acres (2 a 4 ha) y generalmente donde es importante determinar los niveles máximos de inundación del diseño con mayor precisión. Se cuenta con una gama de programas computarizados para sistemas de microcomputadoras que simplifican la aplicación de estas técnicas.

Aspectos del Diseño Hidráulico

El diseño para el volumen de contención es relativamente sencillo. El volumen de inundación apropiado se obtiene multiplicando el área de recolección total por la precipitación excedente del diseño o el agua de nieve acumulada equivalente que se describió anteriormente. Luego pueden diseñarse los volúmenes apropiados de almacenamiento de inundación. Este enfoque simplificado es aplicable al área dentro de la berma de contención de capas impermeabilizadas de lixiviación y también puede utilizarse para las pozas de solución madre y gastada.

3. Evaluaciones del Balance de Agua

a) Generalidades

El balance de agua de una operación de lixiviación en pila implica dos componentes principales. Estos son el circuito del proceso y el circuito natural del agua. El circuito del proceso es el flujo de fluidos del proceso relativamente constante y predecible a través del sistema. Incluye agua de reposición, adición de reactivos y requerimientos de la solución operante. En algunos casos, puede requerirse una purga a fin de mantener la adecuada calidad del agua. El ciclo natural del agua se superpone al circuito del proceso e incluye la variación aleatoria en el tiempo de precipitación y/o deshielo de nieve y pérdidas por evaporación. La Figura 2.6 ilustra estos circuitos.

DISEÑO Y OPERACIONES

Capítulo V. DISEÑO Y OPERACIONES

1. Preparación del Area

El objetivo de la preparación del área radica en eliminar los materiales que pueden utilizarse en las actividades de reforestación o que pueden afectar la estabilidad e integridad de las instalaciones que contienen las soluciones del proceso. Dichas instalaciones incluyen la capa impermeabilizada de lixiviación así como las pozas del proceso.

Los materiales inadecuados, es decir los materiales que tienen baja resistencia en términos de consolidación y resistencia al corte, tales como productos orgánicos y arcillas suaves, quizás tengan que ser excavados y reemplazados por mejores materiales. Con frecuencia es necesario rellenar algunas áreas con relleno estructural. Por tanto deberá tenerse cuidado de proporcionar una adecuada compactación de dicho relleno, de forma que no ocurra un asentamiento diferencial que pueda dañar el sistema de revestimiento.

La preparación del lugar incluye el retiro por capas y el apilamiento de la capa superior del suelo/medio de crecimiento.

Deberá observarse que si el lugar tiene grandes áreas de afloramiento de lecho rocoso, el retiro por capas de pequeña vegetación tales como hierbas y pequeña maleza quizás no sea práctico y la colocación de relleno estructural a fin de preparar una base para la instalación de revestimiento puede efectuarse directamente en la parte superficial de la vegetación.

2. Recolección de Lixiviado

El objetivo de la recolección de lixiviado radica en recolectar éste en la pila con mínimo incremento de presión hidráulica en el revestimiento. El desarrollo de una presión en el revestimiento puede dar como resultado el potencial aumento en las pérdidas por filtraciones a través de los defectos de revestimiento. También puede dar como resultado el desarrollo de presión de poros en la parte superior del revestimiento que puede afectar la estabilidad general de la pila. Si el mineral es grueso, y por consiguiente tiene una alta permeabilidad, se reduce la necesidad de contar con un sistema de recolección de lixiviado especialmente diseñado.

La permeabilidad del material de lixiviación en pila depende de la granulometría del material así como de la construcción de pilas. En el caso de pilas tal como salen de la mina construidas por descarga y nivelación, partículas más grandes rodarán hasta el fondo de la capa y formarán un lecho de mayor permeabilidad. En este caso, quizás no se requiera proporcionar una capa especial para la recolección de lixiviado.

En general, se recomienda que la permeabilidad de una capa continua de recolección de lixiviado tenga por lo menos una, y preferiblemente dos órdenes de magnitud, mayor que la del material de lixiviación en pila. Se pueden utilizar sistemas de tubería para proporcionar una recolección de lixiviado, reduciendo así la presión en el revestimiento. Los tubos de polietileno perforados y corrugados se han utilizado con éxito para recolectar lixiviado en las capas impermeabilizadas de lixiviación en pila. Frecuentemente se utilizan espaciados de 5 m y más.

3. Construcción de Pilas

La construcción exitosa de pilas varía con el tipo de mineral y, puesto que dos cuerpos minerales no son exactamente iguales, generalmente son necesarias algunas ligeras modificaciones para cada proyecto específico. Sin embargo, es posible generalizar en términos de las técnicas apropiadas que se utilizarán con los minerales que tienen características similares. Esta sección trata acerca de los tres métodos más comúnmente utilizados de construcción de pilas y proporciona algunas pautas con respecto a los tipos de mineral, impedimentos de construcción y parámetros de altura de las capas para cada uno de los tres (Muhtadi, 1988).

a) Descarga y Nivelación del Mineral tal como sale de la Mina

El método de construcción de pilas tal como sale de la mina sólo puede utilizarse con mineral de naturaleza altamente siliciosa (esto es, mineral que no genere una gran cantidad de finos, incluso con un tractor y bulldozer nivelando la parte superior de la pila). La construcción básica de este tipo de pila se muestra en la Figura 5.1. Se construye una rampa para tener acceso a uno de los extremos de la pila, generalmente empleando ganga para construirla hasta la altura de la primera capa de mineral, como se muestra en la figura. Se establece un estrecho camino a través de la parte superior del mineral previamente descargado de forma que los camiones que transportan mineral puedan dirigirse al borde de la rampa y descargar el mineral en la pendiente interior de la pila sobre la capa impermeabilizada en el ángulo de reposo. La

sucesiva descarga en esta forma permite que la pila se extienda hacia dentro dirigiéndose al centro de la pila hasta que el fondo de la capa impermeabilizada esté totalmente cubierta con la primera capa de mineral.

A medida que el frente de la descarga avanza hacia adentro, se utiliza un tractor/bulldozer para nivelar la parte superior que va avanzando de la pila. La nivelación va seguida de un profundo ripeado del mineral. La difusión lateral del mineral al punto necesario se logra también con el tractor/bulldozer. Con la finalidad de limitar la compactación de la parte superior de la pila, los camiones que transportan el mineral están limitados al estrecho camino de acceso establecido.

b) Descarga Superpuesta/Descarga Superpuesta con Nivelación por Bulldozer

El método de descarga superpuesta (o su variación, el método de descarga superpuesta con nivelación por bulldozer) se utiliza cuando cabe la probabilidad de que el mineral genere excesivos finos durante su tratamiento, al igual que con minerales triturados y aglomerados que necesiten un nivel muy bajo de tratamiento físico antes de la lixiviación. En la figura 5.2 se muestra la construcción de este tipo de pila. Una vez que la capa inicial de mineral triturado está en su lugar, los camiones transportadores de mineral entran en la capa impermeabilizada de lixiviación, depositando sus cargas en pequeñas pilas. Cada camión avanza lo más cerca posible a una pila de mineral previamente descargado y libera su carga, proporcionando así una parcial superposición con las pilas adyacentes (Figura 5.2). Las pilas (o montones) generalmente tienen una profundidad de 2 m, y la parte superior de la pila consiste en una serie de montículos y surcos. Como se observara anteriormente, este método de construcción de pilas trae como resultado un manipuleo muy reducido del mineral, y no se producirá ningún tráfico de compactación en la parte superior de la pila a menos que se haga la nivelación antes de la lixiviación.

Una variación del método de descarga superpuesta consiste en descargar el mineral en la parte inferior de la pila y luego utilizar un cargador para apilar el mineral. Este método trae como resultado pilas más altas que con la descarga superpuesta convencional, con capas de 5 mts en oposición a las de 2 m anteriormente explicadas. También se logra una superficie de pila más uniforme, particularmente cuando los hábiles operadores de equipos son responsables de la construcción de pilas. Las desventajas de esta variación se centran alrededor del hecho de que el mineral requiere más manipuleo, produciendo potencialmente la segregación y ruptura de partículas. Además, se requiere un cargador. Si el mineral puede soportar el manipuleo adicional, se preferirá este método porque se podrán lograr capas más altas.

c) Apilación con Faja Transportadora

Los sistemas de apilación con faja transportadora se han hecho cada vez más comunes en los últimos años como un método de construcción de pilas. Se ha descubierto que los sistemas de apilación con faja transportadora son apropiados para la construcción de pilas con minerales triturados, minerales triturados y aglomerados, y relaves aglomerados. Estos sistemas tratan los minerales suavemente y con un mínimo de manipuleo. Aunque cada sistema de apilación con faja transportadora difiere en cierto grado, todos utilizan los principios generales descritos en los siguientes párrafos y mostrados en las Figuras 5.3 y 5.4.

Una vez que el mineral es descargado de una tolva de minerales (en el caso de mineral triturado) o de un cilindro de aglomeración (en el caso de mineral aglomerado), es recibido por una faja transportadora primaria, uno de los componentes fundamentales del sistema transportador (Figura 5.3). Desde esta faja transportadora primaria, generalmente el mineral es transportado en una serie de transportadores intermedios «zigzagueantes» (grúa locomotora) hacia un transportador/acumulador con brazo radial (Figura 5.3). El apilador con brazo radial tiene ruedas de doble tracción, que le permiten desplazarse de adelante hacia atrás, así como de lado a lado (haciendo girar las ruedas en media revolución). Una sección telescópica al final de lo apilado permite una mayor flexibilidad en términos de colocación del mineral (Figura 5.3).

En una típica configuración de acumulación, el apilador se utiliza para construir una ruma continua de mineral sobre la capa impermeabilizada que va de lado a lado a la altura de elevación preferida, generalmente 20 pies (Figura 5.4). El apilador luego coloca el mineral sobre la capa impermeabilizada en forma zigzagueante, aumentando continuamente la ruma hasta rellenar la capa impermeabilizada (Figura 5.4) La adecuada operación del acumulador dará como resultado una superficie de pila bastante lisa.

A medida que el apilador retrocede (esto es, a medida que la pila de mineral avanza hacia el apilador, Figura 5.4), las secciones de transportadores «intermedios» pueden eliminarse con un mínimo período de paralización por avería.

4. Aplicación de las Soluciones

Las técnicas de aplicación de soluciones adecuadamente diseñadas proporcionan el máximo contacto entre el mineral acumulado en la capa impermeabilizada y la solución de lixiviación. Cuando una pila es lixiviada, se desarrolla un patrón de flujo de solución a través de la pila; inevitablemente algunas porciones del mineral tienen menos exposición a la solución de lixiviación que otras. La elección apropiada de un sistema de aplicación, junto con la adecuada velocidad de flujo y mantenimiento del sistema, puede y logrará minimizar los cortos circuitos y el inadecuado/desigual humedecimiento de la pila.

La información sobre las velocidades requeridas de aplicación de la solución generalmente se obtiene durante los programas de pruebas metalúrgicas y luego se utiliza en el diseño de un sistema de aplicación para un proyecto determinado.

Las velocidades precisas de aplicación de soluciones en el caso de proyectos individuales pueden establecerse mediante la selección de patrones y tipos de aspersor, junto con las adecuadas presiones de operación y espaciado. El método de aplicación seleccionado deberá proporcionar una velocidad de aplicación uniforme.

En la práctica, la aplicación de soluciones se ha logrado a través de distintos métodos tales como inundaciones o pozas, aspersores tipo «wobbler» o «wiggler», sistemas regulares de aspersores rotativos para césped, y sistemas de irrigación por goteo (los cuales, para fines de esta explicación, se denominarán emisores de presión). En este documento se hace una breve mención sobre inundaciones y wigglers como técnicas de aplicación de soluciones; sin embargo, los más comúnmente utilizados y más exitosos son el aspersor y los sistemas emisores de presión.

El Wobbler, comercializado por Senninger Irrigation, Inc. de Orlando, Florida es un aspersor descentrado de acción rotativa que ha encontrado amplia aplicación en la industria de lixiviación en pila. Debido a su acción rotativa descentrada, es importante que el Wobbler esté seguramente montado en soportes de acero con una altura no mayor de 3 m sobre la superficie terrestre.

Los emisores de presión pueden equipararse con los sistemas agrícolas de irrigación por goteo. Los mecanismos reales de los emisores de presión son dispositivos de flujo que se unen dentro de la tubería para proporcionar una distribución uniforme de la solución. Las tuberías con emisores instalados operan a una presión bastante baja (generalmente, 100-140 kPa). Las tuberías, con frecuencia, se entierran en el mineral a una profundidad de aproximadamente 25 cm, aunque también se practica la instalación superficial de emisores. Probablemente el factor más significativo al determinar si se va a enterrar los emisores o no, es el clima del área en cuestión. En los climas con fuertes condiciones invernales, pueden lograrse varios meses adicionales de tiempo de operación enterrando las tuberías.

La principal ventaja para el usuario de emisores es que el sistema proporciona un continuo goteo con un mínimo de impacto de gotas, minimizando así la migración de finos y la canalización mientras que una desventaja es que requiere más trabajo para su instalación. Como resultado del continuo goteo, la pila de mineral es humedecida lateral y verticalmente por acción capilar, a velocidades muy similares a las producidas por boquillas de dispersión. Entre otras ventajas del uso de los emisores de presión se incluye:

La capacidad de permitir operaciones invernales.
La reducción en pérdidas de evaporación de agua.

ESTABILIDAD

Capítulo VI. ESTABILIDAD DE LAS PILAS

El objetivo de determinar la estabilidad de las pilas consiste en desarrollar un diseño para la instalación de lixiviación en pila de forma que se mantenga la estabilidad contra los deslizamientos bajo condiciones estáticas y pseudo-estáticas de carga.

La estabilidad de una pila es una consideración muy importante puesto que la inestabilidad podría provocar la rasgadura del sistema de revestimiento y por tanto la pérdida de contención. La estabilidad de una pila está determinada por la resistencia al corte de la interfase más débil o a veces por los materiales débiles de cimentación. Con frecuencia, la interfase más débil es aquella entre una geomembrana y algún otro geosintético. Deberán realizarse pruebas específicas del lugar a fin de evaluar la resistencia al corte de las interfaces críticas.

La evaluación de la estabilidad de la pendiente consiste en seleccionar una sección bi-dimensional a través de la pila, definiendo una probable superficie de falla (como una de las superficies que se muestran en la Figura 6.1 para una pila típica), calculando luego el factor de seguridad a lo largo de esa superficie de falla. Una minuciosa evaluación de la estabilidad de la pendiente requiere una cuidadosa selección de la superficie de falla más probable, así como un método técnicamente correcto y consistente para calcular el factor de seguridad.

Los principales ítems que afectan el análisis de la estabilidad son:

- La geometría de la sección que es analizada.
- Los esfuerzos cortantes y/o resistencias friccionales de los materiales.
- Las condiciones de presión de agua de los poros en la pila y cimientos.

La geometría y las condiciones de presión de poros pueden modificarse durante el diseño a fin de lograr una estabilidad aceptable. Los esfuerzos cortantes y las resistencias friccionales (en el caso de materiales sintéticos) son una función de los materiales que se utilizarán, y pueden modificarse sólo empleando distintos materiales.

Se ha publicado mucho acerca de los análisis de estabilidad. Los textos geotécnicos contienen referencias no sólo a soluciones analíticas sino también a evaluaciones computarizadas (Blight, 1986; Campbell, 1992; Tape and Harper, 1987).

Las cargas de sismos pueden simularse realizando análisis pseudo-estáticos con el fin de calcular el comportamiento de la pila bajo una aceleración sísmica específica. Generalmente, sólo se especifican las aceleraciones horizontales y se toman como un porcentaje de la aceleración terrestre máxima calculada en el lugar. Existe una incertidumbre considerable sobre cuál es el porcentaje aceptable de aceleración máxima que se deberá utilizar. Se recomienda que la estabilidad de la pila sea evaluada para el 60-80% de la aceleración máxima.

Los análisis de desplazamiento pueden realizarse empleando el enfoque publicado por Newmark (1965). En este análisis los desplazamientos se calculan en base a un registro de sismo. Aunque dichos análisis son más sofisticados que un análisis de equilibrio límite, podría ser útil evaluar los desplazamientos específicos del lugar y por lo tanto, tomar una decisión sobre los riesgos relacionados con el diseño específico.

Generalmente, no se realizan análisis de licuefacción para mineral grueso, sin embargo, deberá considerarse un modo de falla potencial en minerales finos.

Los análisis de equilibrio límite se utilizan durante toda la práctica. Los esfuerzos cortantes deberán basarse en evaluaciones de material específico del lugar y no en valores publicados. Tomando como base los análisis de equilibrio límite, el siguiente factor limitante de seguridad generalmente se utiliza en las instalaciones de lixiviación en pila:

Análisis estático de las estructuras de tierra (no componentes sintéticos). El factor de seguridad recomendado es 1,5. Análisis de estabilidad estática de las estructuras donde se efectuaron pruebas específicas del lugar en interfases débiles compuestas por materiales hechos a mano y construcción bien controlada (por ejemplo: revestimiento de arcilla). El factor de seguridad recomendado es 1,3. Análisis de estabilidad pseudo-estática de estructuras donde las pruebas específicas del lugar se efectuaron en interfases débiles compuestas por materiales hechos a mano y construcción bien controlada (por ejemplo: revestimiento de arcilla). El factor de seguridad recomendado es 1,0.

Si el factor pseudo-estático de seguridad es menor que 1,0, podrá realizarse un análisis de desplazamiento con el fin de evaluar los riesgos relativos específicos del lugar.

REFERENCIAS

Blight, G.E., 1987, «Failure Mode», En: Design of Non-Impounding Mine Waste Dumps, M.K. McCarter (ed.), pp. 133-142.

Bonaparte, R. y Giroud, J.P., 1989, «Rates of Leakage Through Liners, Geosynthetics,» Proceedings, Conference.

Caldwell, J.A. Larson N. y Rager R., 1988, «Assessment of the Effects of Potential Ground Subsidence on a Reclaimed Tailings Pile», En: Geotechnical and Geohydrological Aspects of Waste Management, eds D. Van Zyl y otros. Lewis Publishers, Inc. pp. 101-114.

Campbell, D:B:, 1992, «Stability and Performance of Waste Dumps on Steeply Sloping Terrains», International Symposium on Geotechnical Stability in Surface Mining, A.A. Balkema, Rotterdam.

Chow, V.T., 1964, «Handbook of Applied Hydrology», McGraw-Hill Book Company.

Clayton, C.R.A., Simons, N.E., and Matthews, M.C., 1982, «Site Investigations, A Handbook for Engineers», Halsted Press (John Wiley and Sons), 424 pp.

Crouch D.B. y Poulter, D.A., 1985, «Solid Waste Disposal Site Selction for the McLaughlin Gold Project in Northern California», SME - AIME Transactions, V.278, pp.1839-1846.

Day, S.R. y Daniel, D.E., 1984. «Field Permeability Test for Clay Liners», Proceedings Symposium on Hydraulic Barriers in Soil and Rock, American Standard Test Methods, STP 874, Denver, Colorado, pp. 276-287.

Dorey, R., Van Zyl, D. y Kiel J., 1988, «Overview of Heap Leaching Technology,» en Introduction to Evaluation, Design and Operation of Precious Metal Heap Leaching Projects, D.Van Zyl, I. Hutchinson y J.Kiel (eds.) SME, 1988.

Heinen, H.J., McClelland, G.E. y Lindstrom, R.E., 1979. «Enhancing Percolation Rates in Heap Leaching of Gold-Silver Ores,» U.S. Bureau of Mines, RI 8388.

Hiskey, J. Brent, 1985, «Gold and Silver Extraction; the Application of Heap-leaching Cyanidation», Arizona Bureau of Geology and Mineral Technology Fieldnotes, v. 15, no.4, p.1-5.

Holtz, R.D. y Kovacs, W.D., 1981, «An Introduction to Geotechnical Engineering», Prentice-Hall, Inc., 733 pp.

Hunt, R.E., 1986, «Geotechnical Engineering Techniques and Practices», McGraw-Hill.

Hutchison I.P.G. 1988, «Surface Water Balance», En: Introduction to Evaluation, Design and Operation of Precious Metal Heap Leaching Projects, D. Van Zyl, I. Hutchison, y J.Kiel, (eds.) SME, 1988.

Hutchison I.P.G. y Ellison, R., eds., 1992, «Mine Waste Management», Lewis Publishers, Boca Raton y Ann Arbor.

Kays, W.B., 1977, «Construction of Linings for Reservoirs, Tanks and Pollution Control Facilities,» John Wiley & Sons, New York, New York, 379 pp.

Koerner, R.M., 1990, «Designing with Geosynthetics,» 2nd Edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 652 pp.

Lowe, J. y Zaccheo, P.F., 1991, «Subsurface Explorations and Sampling», En: Foundation Engineering Handbook, 2nd Edition, H-Y Fang (ed), Van Nostrand Reinhold.

Marticorena, D. 1991, «Importancia de la Microzonificación de Riesgos para Prevenir Procesos Geodinámicos Externos», En Proceedings 9th Panamerican Conf. Soil Mech. Fdn. Eng., Viña del Mar.

McClelland, G.E. y Eisele, J.A., 1981, «Improvements in Heap Leaching to Recover Silver and Gold from Low-Grade Resources,» U.S. Bureau of Mines RI 8612.

McClelland G.E., Pool S.L. y Eisele, J.A., 1983, «Agglomeration-Heap Leaching Operations in the Precious Metals Industry», U.S. Bureau of Mines IC 8945.

Meigs, 1966, «Geography of Coastal Deserts», UNESCO.

Mudell, J.A., y Bailey, B., 1984, «The Design and Testing of a Compacted Clay Barrier Layer to Limit Percolation Through Landfill Covers,» Proceedings, Symposium on Hydraulic Barriers in Soil and Rock, ASTM, STP 874, Denver, Colorado, pp. 246-262.

Muhtadi, O., 1988, «Heap Construction and Solution Application», en: Introduction to Evaluation, Design and Operation of Precious Metal Heap Leaching Projects, D. Van Zyl, I. Hutchison y J. Kiel, (eds.) SME, 1988.

Murr, L.E., 1980, «Theory and Practice of Copper Sulphide Leaching in Dumps and In situ», Minerals Science and Engineering, v. 12, No. 3, p.121-189.

Nash, W.G., 1912, «Precipitation of Copper From Mine Waters», Minig and Scientific Press, v. 104, No. 5, p. 213-214.

Newmark, N.M., 1965, «The 5th Rankine Lecture - Effects of Earthquake in Dams and Embankments, «Geotechnique, Vol.

5, No. 2, Junio.

Potter, G.M., 1981, «Design Factors of Heap Leaching Operations», Mining Engineering, v. 33, No.3, p. 277-281.

Pu, Y.D., 1982, «The History and Present Status of Practice and Research Work on Solution Mining in China», En: Interfacing Technologies in Solution Mining, W. J. Schlitt y J.B. Hiskey, (eds.), SME-AIME, pp.13-20.

Pyrih, R.Z. y Rouse, J.V.: 1989, «Attenuation Processes: A Viable Regulatory Alternative», Environmental Hazard Conference and Exposition, Bellevue, Washington, Preprint. Febrero 14-16, 1989.

Robertson, A.M., T.A.Shepherd y D.J.A. Van Zyl, 1980, «Uranium Tailings Impoundment Site Selection», En Proceedings, Symposium on Uranium Mill Tailings Management, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

Smith, A. y T. Mudder, 1992, «Chemistry and Treatment of Cyanide Wastes», Minig Journal Books, Ltd. Londres, Inglaterra.

Soil Conservation Service, 1972, «Handbook on Hydrology», U.S. Department of Commerce, Soil Conservation Service.

Tape, R.T., y Harper, T.G., 1987, «Potential for Heap Leach Mass Instability», En: Geotechnical Aspects of Heap Leach Design, D. Van Zyl, (ed.) SME-AIME, pp. 51-54.

Taylor, J.H. y Whelan, P.F., 1942, «The Leaching of Cupreous Pyrites and the Precipitation of Copper at Rio Tinto, Spain», Institution of Mining and Metallurgy Bulletin, 457, p. 1-36.

Thompson, L.C., 1990. «New Technologies for Mining Waste Management, Biotreatment Processes for Cyanide, Nitrates and Heavy Metals», En Proceedings of the Western Regional Symposium on Mining and Mineral Processing Wastes. (University of California at Barkeley, SME, Mayo 30- Junio 1, 1990.

Thorstad, L.E., 1987, «Hoe Heap Leaching Changed the West», World Investment News, a Pacific Regency Publication, Vancouver, B.C., Febrero, pp.31-33.

USBR (United States Bureau of Reclamation), 1977, «Design of Small Dams,» United States Department of the Interior, US Government Printing Office.

Vick, S.G., 1994, «Draft Guide for Mine and Mill Tailings Management», Preparado para el Ministerio de Energía y Minas, Gobierno del Perú, Marzo, 1994.

Von Michaelis, H. 1985, «Role of Cyanide in Gold and Silver Recovery», En: Cyanide and the Environment, D. Van Zyl (ed.), Colorado State University, (BiTech Publishers, Vancouver).

Wadsworth, M.E., 1981, «Recovery of Metal Values for Low-Grade Copper Sulfide Ores», Separation Science and Technology, v. 16, No. 9, p. 1091-1112.

GLOSARIO DE TERMINOS TECNICOS INGLES - CASTELLANO

Water balance : balance de agua

electrowining : electrodeposición

solution mining : minería de soluciones

tank house : casa de tanques

liner : revestimiento

layout : disposición en planta

milled : molido

run of mine : tal como sale de lamina

incremental cost : costo diferencial

dumping : descarga

layering : estratificación

sprinkler : aspersor

earthwork : terraplén

to key : construir

bedrock : suelo rocoso

lift : capas de mineral

buttres : refuerzo

residence time : tiempo de residencia

to bresch : abrir una brecha

dump footprint : base del botadero

to end dump : descargar

sink : colector

gold placer : lavadero de oro

dredge : draga

bleed off : purga o sangría

to take up : recibir, tomar

outage : interrupción

vane shear testing : pruebas de estabilidad al corte

packer : consolidación

puncture : perforación
silty clay : arcilla limonítica
roller : rodillo
peaked curve : curva más pronunciada
lattice : red cristalina
grader : nivelador
rototiller : arado
agricultural disc : disco agrícola, que se usa para arar
balling : aglomeraciones
pug mill : mezclador
pallets : paletas
air lance : lanza de aire
tears : rajaduras
slings : protectores
peel and shear : raspar y cortar
shear : corte
outcrop : afloramiento
lozing : nivelación
ripping : ripear o ripeado
plug dumping : descarga superpuesta
overlap : superponer
mounds : montículos
hooper : tolva
ridge : ruma