

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA,**  
**MINERA Y METALÚRGICA**



***Diseño y Construcción de PADS***  
***de Lixiviación en Pilas***

**INFORME DE INGENIERÍA**

**Para optar el Título Profesional de:**  
**INGENIERO DE MINAS**

**Presentado por:**  
**CARLOS DAVID NUÑOVERO REBAZA**

**PROMOCIÓN 93-II**

***Lima – Perú***  
***2000***

## RESUMEN

Pág.

**AGRADECIMIENTO**

**DEDICATORIA**

**CERTIFICADO DE TRABAJO**

<b>DISEÑO DE LIXIVIACIÓN EN PILAS Y EN BOTADEROS.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Introducción.....</b>	<b>1</b>
Instalaciones de Lixiviación en Botaderos.....	3
Canchas (PADS) de Lixiviación en Pilas.....	4
<b>1.2 Selección de la Ubicación.....</b>	<b>5</b>
Identificando Ubicaciones Potenciales.....	6
Criterios de Selección del Sitio.....	7
Clasificación Jerárquica.....	9
<b>1.3 Diseño Ingenieril.....</b>	<b>11</b>
Disposición General de las Instalaciones.....	13
Diseño del Sistema de Revestimiento.....	15
Balance de Agua.....	17
Estructuras de Derivación.....	21
Asentamiento del Terreno de Fundación.....	22
Estabilidad de Taludes.....	24
Tabla 1 – Ensayos resistencia al Corte de Geomembrana.....	27
Figura 1 – Esquema Sistema Típico de Lixiviaciones en Botaderos.....	29
Figura 2 – Esquema Ciclo Hidrológico del Agua.....	29
Figura 3 – Planos de Falla de Taludes.....	30
Figura 4 – Nomograma de Estabilidad de Talud (HDPE – Arcilla).....	31
Figura 5 – Nomograma de Estabilidad de Talud (HDPE – Arena).....	31

<b>CONSTRUCCIÓN DE PAD DE LIXIVIACION EN PILAS</b> .....	32
1.1 Introducción.....	32
1.2 Desbroce de Material Orgánico.....	33
1.3 Desbroce de Material no Apto para Consolidación.....	34
1.4 Acarreo y Eliminación de Material Desbrozado .....	34
1.5 Material de Relleno para Consolidación .....	35
1.6 Nivelación y Compactación de Terreno .....	35
1.7 Instalación de Geomembrana .....	36
1.8 Instalación de Tuberías de Recolección. ....	37
1.9 Capa de Protección (Cubierta) .....	38
1.10 Carguío de PAD por Pilas .....	39
1.11 Construcción de Zanjas, Canales y Bermas de Protección.....	39
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	41
<b>CROQUIS Y FOTOS VARIAS</b>	
Plano de Planta de un PAD (hecho en AutoCAD).....	42
Diagrama de Flujo de Operación de un PAD (hecho en AutoCAD) .....	43
Foto - Instalación de Geomembrana .....	44
Foto - Instalación de Tuberías de Recolección y Capa de Protección .....	45
Foto - Poza de Solución Rica .....	46
Especificaciones Técnicas de Geomembrana HD.....	47

## **AGRADECIMIENTO**

*Mi agradecimiento al Ing. Jofreé Duran Huerta de la Cía. S.V.S. Ingenieros S.A., quien me ha brindado información valiosa para la materialización de este trabajo.*

*También agradezco a mis profesores de la UNI, por sus valiosas experiencias transmitidas en las aulas de la Facultad de Minas, asimismo a los señores empleados y demás trabajadores, que de alguna manera contribuyeron en mi formación.*

## ***DEDICATORIA***

*A mis padres Manuel y Modesta, quienes con sus sacrificada y esforzada dedicación han logrado hacer de mi un Profesional en todo el sentido de la palabra.*

*A mi esposa Ana María, quien en todo momento me brindó su apoyo incondicional, y a mis queridos hijos Daniela y Carlos, quienes son la razón de mi existencia y de mi superación.*

## **DISEÑO DE LIXIVIACIÓN EN PILAS Y EN BOTADEROS**

Esta sección introduce los conceptos básicos del diseño de lixiviación en pilas y en botaderos. Estos conceptos de diseño se basan en principios de ingeniería respaldados por la experiencia desarrollada durante los últimos años, durante los cuales la lixiviación se ha convertido en una importante técnica de procesamiento de mineral.

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

La lixiviación en pilas y en botaderos es el término dado a la técnica hidrometalúrgica de extraer metales pasando una solución a través de una *pila* de mineral. La solución lixivante reacciona químicamente con el mineral, disolviendo los metales y retirándolos de la roca mineralizada, produciendo una solución “rica”. Después de pasar por la pila, la solución es recolectada y transportada a una planta de recuperación donde se extrae de la solución los metales preciosos. Esta solución “pobre” es ajustada químicamente y devuelta a la parte superior de la pila para otro ciclo.

El proceso de lixiviación ha sido utilizado durante siglos como un método económico para la extracción de metales valiosos del mineral. En los tiempos más modernos, la tecnología de lixiviación ha sido utilizada comúnmente para recuperar cobre, oro, uranio, así como también una gran variedad de minerales industriales como el yodo. La lixiviación en pilas para la recuperación de oro fue desarrollada por Heinen, Lindstrom y otros en la Dirección de Minas de EEUU durante finales del año 1966 y principios de la década del 70, como un método de recuperación económico para minerales de baja ley. La primera aplicación a gran escala de la tecnología de lixiviación en pilas fue en la Mina Carlin en 1970, seguida por las instalaciones en las operaciones de Cortez y Smokey Valley a fines de dicha década.

La industria minera ha incrementado drásticamente el uso de esta tecnología de lixiviación desde principios de la década de los 80, principalmente en el procesamiento del oro. Este incremento fue en respuesta directa a los valores del oro que se elevaban dramáticamente, luego del término de la conversión dólar–oro en los 70. Durante este período, se combinó muchos adelantos tecnológicos, conllevando a rápidos progresos en el estado general de la práctica. Estos adelantos tecnológicos incluyen un incremento en la capacidad de extraer de la mina muy grandes cantidades de material en forma económica, desarrollos en los procesos de cianuración y aglomeración, y desarrollo de sistemas de contención física efectivos.

Los métodos históricos de extracción y procesamiento de minerales, que incluyen la separación a gravedad, la amalgamación o los circuitos de flotación y/o carbono en pulpa (CIP), han estado asociados a depósitos de alta ley donde el costo relativamente alto del procesamiento del mineral es compensado por el mayor valor del mineral. Los procesos convencionales de concentración presentan con frecuencia eficiencias altas de recuperación de mineral, observándose en algunas plantas una recuperación de hasta un 95 por ciento.

La extensión del uso de la tecnología de lixiviación en la industria minera durante la década del 80 y en la del 90 ha sido impulsada por la exploración y el desarrollo de grandes depósitos de mineral de baja ley, el reprocesamiento de material “estéril” existente y el deseo de extraer en forma más efectiva los minerales disponibles de cuerpos mineralizados nuevos y existentes. El oeste de los Estados Unidos ha sido testigo de la mayor parte de este desarrollo, con varias de grandes operaciones que se iniciaron durante este período. La utilización de la tecnología de lixiviación ha sido llevada a otras regiones del mundo que tienen ambientes de deposición de mineral similares. Estos grandes depósitos de mineral de baja ley a menudo rodean una zona mineralizada de mayor ley, resultando en una combinación plantas de concentración para procesar los minerales de más alta ley e instalaciones de lixiviación para el material mineral que tiene una ley que se encuentra entre la que resulta económico procesar con tecnología de lixiviación y la que puede ser concentrada económicamente (conocida como la “ley de corte” de procesamiento de mineral).

La principal diferencia entre elegir la concentración o la lixiviación está relacionada al aspecto económico. La concentración normalmente es mucho más cara, tanto en base al costo de operación por tonelada como a los costos de capital (construcción). El costo típico de construcción de una planta concentradora para procesar un cuerpo mineralizado oxidado (de oro) de 10 millones de toneladas se encontraría en un rango de 10 a 30 millones de dólares y más. Los costos de capital para una instalación de lixiviación del mismo tamaño estaría dentro del rango de 2 a 5 millones de dólares (dólares a 1993). En contraste, como se observa, con la concentración se puede esperar una recuperación de mineral de 95 por ciento del mineral disponible, mientras que con la lixiviación se recupera normalmente de 50 a 80 por ciento del mineral disponible. Por dicha razón, es según el aspecto económico que se elige para una determinada ley de mineral.

***Instalaciones de Lixiviación en Botaderos*** – Generalmente se considera a la lixiviación en botaderos como la práctica de lixiviación de cobre a partir de grandes pilas de material que muchas veces se asemejan a los botaderos de desmonte. Sin embargo, con esta tecnología también se puede recuperar otros minerales. Estos botaderos tienen por lo general varios cientos de pies altura, y pueden contener cientos de millones de toneladas de mineral de baja ley. En la práctica, material sin procesar (tal como sale de la mina), o material de ley de lixiviación chancado que se encuentra debajo de la ley de corte de procesamiento, es colocado en grandes botaderos construidos utilizando las prácticas de descarga con volquete al extremo. Según las normas ambientales actuales, estos botaderos se construyen normalmente sobre una superficie revestida, aunque en algunos estados se permite construir estas instalaciones de lixiviación en botaderos sin revestimiento, siempre que se cuente con métodos alternativos de contención de la solución (por ejemplo, estructuras geológicas que sirvan de barrera a la migración de solución).

Una vez construidos, estos botaderos son regados con una solución de proceso, generalmente ácido sulfúrico diluido en el caso de las instalaciones de lixiviación en botaderos de cobre. La solución de lixiviación percola a través del botadero, reemplazando los iones de cobre con iones férricos, hasta que el lixiviado llegue al sistema de recuperación de solución. La solución de lixiviación rica (también



denominada “PLS”) es recolectada y conducida a una poza provisional revestida (de PLS) antes de ser procesada.

El circuito de recuperación del mineral para cobre generalmente comprende un circuito de electrodeposición en el que el cobre en solución se pega a una malla de acero formando placas, extrayéndose así el metal de la solución. El cobre es extraído de la lana de acero en un horno eléctrico.

La solución gastada del circuito de recuperación, conocida como “rafinato” es bombeada a una poza de recolección revestida antes de su reaplicación al botadero. La Figura 1 es un diagrama esquemático para un sistema típico de lixiviación en botadero.

***Canchas de Lixiviación en Pilas*** – Las canchas de lixiviación en pilas son básicamente un perfeccionamiento de la tecnología de lixiviación en botaderos. Dicho perfeccionamiento es un esfuerzo adicional para procesar el mineral y contener la solución. Como antes, el mineral que es de ley inferior para procesamiento pero económica para procesar con técnicas de lixiviación en pilas es segregado y colocado en una superficie revestida. Este mineral de lixiviación en pilas puede ser o no ser triturado, dependiendo de la optimización del aspecto económico asociado a los costos crecientes del chancado y a las altas tasas de recuperación. En general, el mineral de menor tamaño presenta tasas de recuperación más elevadas y rápidas, pero con crecientes costos de procesamiento.

Generalmente, hay dos tipos de canchas de lixiviación: las canchas planas y los rellenos de valle.

Las canchas planas son instalaciones relativamente llanas construidas con niveles poco profundos típicamente entre 1 y 8 por ciento. El mineral es colocado en estas canchas en capas, produciendo como mínimo dos taludes exteriores independientes. Las canchas planas son el tipo más común utilizado por sus muchas ventajas en comparación con las canchas tipo relleno de valle. Estas ventajas incluyen alturas relativamente bajas, uniformidad del espesor del material, un mejor control de la solución y tasas de recuperación relativamente altas. La principal desventaja es que se requiere un área

nivelada naturalmente para construir en forma económica dichas instalaciones sin costos excesivos por movimientos de tierra.

Las canchas planas pueden ser instalaciones de un solo uso (dedicadas) o de múltiples usos (reutilizables). Una cancha de lixiviación en pilas dedicado proporciona la ubicación para el procesamiento y la subsiguiente destoxificación y cierre en la cancha. Una cancha reutilizable permite el procesamiento y la destoxificación en la instalación revestida, luego de lo cual el material es removido y dispuesto en un área in-situ no revestida. Tras la remoción del mineral gastado, la cancha reutilizable se encuentra disponible para procesar otro ciclo de mineral fresco.

Los rellenos de valle son construidos en terreno montañoso el cual no permite la construcción de una cancha plana. Se selecciona un valle cuyos flancos no sean más empinados que aprox. 3H:1V. El mineral de lixiviación en pilas es colocado en el valle en capas individuales, teniendo contacto con los dos flancos del valle para un sostenimiento estructural. La cara aguas abajo puede quedar libre (mineral expuesto) o puede sostenerse con un refuerzo de altura total o parcial. Los rellenos de valle presentan siempre instalaciones de un solo uso, en donde el material de baja ley es procesado, destoxificado y cerrado in-situ.

## **1.2 SELECCIÓN DE LA UBICACIÓN**

La ubicación de las instalaciones de lixiviación en pilas y botaderos debe considerarse cuidadosamente los aspectos económico y ambiental, optimizando el costo de la instalación mientras se minimiza el potencial de impacto ambiental. Esta visión económica y ambiental del proceso de selección de la ubicación debe efectuarse desde una perspectiva a largo plazo, considerando la vida operacional de la instalación así como los asuntos de cierre y post-cierre. En pocas palabras, cada instalación propuesta debe ser localizada y diseñada teniendo en mente el cierre.

La *selección de ubicación* es definida aquí como la metodología lógica, sistemática y justificable que se utiliza para evaluar una serie de posibles ubicaciones para una instalación, encontrándose como resultado el “mejor” sitio. El mejor *sitio* se define pues

como la ubicación que equilibra apropiadamente los aspectos técnicos, económicos, sociales (políticos) y los impactos ambientales.

El proceso de selección de la ubicación comprende la identificación de los sitios potenciales para los requerimientos de procesamiento dados, la identificación de los criterios de selección de la ubicación, la evaluación de cada ubicación con cada criterio de selección y la calificación de cada sitio.

***Identificando Ubicaciones Potenciales***– Los sitios potenciales son seleccionados en el área circundante al cuerpo o cuerpos mineralizados. Cabe resaltar que la ubicación del cuerpo mineralizado es siempre fija; un hecho que a veces no es completamente entendido por el público. En general, el área que debe ser evaluada para ubicaciones potenciales se extiende desde el cuerpo mineralizado hasta una distancia a la que los costos de acarreo hacen que el proyecto no resulte económico; p. ej., debajo de la tasa mínima de rédito, según la definen los inversionistas.

A manera de ejemplo, supongamos que una empresa minera a encontrado un depósito de oro de baja ley de 10 millones de toneladas que presenta una ley recuperable de 0.08 oz/ton. Suponiendo que el precio del oro para fines de estudios de factibilidad es de \$350 por onza, este material vale \$28 por ton. Los costos de capital, operación y desarrollo se estiman entre un rango de \$275 por onza (\$22 por tonelada) resultando en una “ganancia” disponible de \$6 por tonelada. Con una tasa mínima de utilidad de la inversión del 15 por ciento, la ganancia requerida por tonelada minada es \$3.30. Esto deja \$2.70 por tonelada disponibles para un factor de contingencia; excesos del costo anticipado en construcción, operaciones, baja del precio de los metales, etc. Suponiendo que el propietario requiere \$2 por tonelada para cubrir los costos inesperados correspondientes a un factor de contingencia del 9 por ciento, \$0.70 por tonelada se encuentra disponible como costos diferenciales para el acarreo del mineral. A un costo diferencial del acarreo de \$0.15 por tonelada-milla, el mayor radio económico para ubicaciones potenciales de una cancha es aproximadamente 5 millas. Este radio asume que el terreno es más o menos igual en todas las direcciones y que los costos de construcción de caminos de acarreo y de operación no son significativamente altos (es decir, terreno relativamente plano).

Al seleccionar una ubicación, se puede utilizar cualquier defecto crítico para descartar el sitio. Los defectos críticos son aquellos atributos físicos que van a evitar el desarrollo de las instalaciones deseadas. Ejemplos de estos son las características de ubicaciones prohibidas por la ley, por constituir una llanura de inundación, encontrarse cerca de agua subterránea superficial, etc., y atributos físicos tales como un tamaño inadecuado, fallas de sismos activos, derrumbes, áreas propensas a licuefacción, estructuras subterráneas históricas que pueden colapsar bajo carga, etc.

La selección inicial de los lugares potenciales sólo debe estar limitada por la factibilidad técnica y la distancia económica de acarreo, sin dejar de considerar sitios potenciales por ideas preconcebidas. Con mucha frecuencia se descarta ubicaciones potenciales debido a la pertenencia de las propiedades, a asuntos ambientales y costos de construcción, sin evaluar completamente el lugar. Esta eliminación de ubicaciones potenciales antes de la evaluación puede resultar en el descarte de un lugar que podría haber presentado el menor impacto general y un costo óptimo de haber sido sometido a un proceso completo de evaluación del lugar. Por ejemplo, si se utiliza la pertenencia de las tierras para descartar ubicaciones, el sitio final seleccionado podría estar ubicado a cierta distancia del cuerpo mineralizado, resultando en un incremento en los costos debido al incremento en la distancia de acarreo. Este costo total puede fácilmente sobrepasar los costos de adquisición de la propiedad para una ubicación dada. Empleando los datos del ejemplo anterior, se tiene que por cada milla más de acarreo se obtiene un incremento en el costo de \$ 1.5 millones, que podrían haber sido utilizados para adquirir una parte significativa de la propiedad. Similarmente, si se utiliza en forma prematura los impactos ambientales como un factor limitante, el resultado puede ser el evitar un sitio de cierre que parece causar un impacto no deseado (económico por ejemplo) en favor de una ubicación más alejada que tiene un menor impacto significativo del lugar pero resulta en impactos totales mayores debido a la mayor extensión del área de operación.

***Criterios de Selección del Sitio*** – Los criterios de selección del sitio son aquellos parámetros que son empleados para evaluar en forma individual ubicaciones para cada proyecto. Estos parámetros pueden incluir características comunes a todos los sitios, además de las características únicas de cada ubicación; sin embargo, cabe resaltar que

son las características únicas las que se van a utilizar esencialmente para comparar y calificar cada sitio en particular.

El método más común para evaluar cada ubicación es subdividir las características de ellas según se trate de aspectos técnicos, ambientales, sociales o políticos. Por lo general, no se combinan estos grupos de parámetros durante el proceso de selección del sitio para obtener un solo puntaje de calificación relativo combinado, sino que se mantienen en grupos individuales. La razón para mantener esta separación es que es difícil combinar o comparar impactos económicos con impactos ambientales o sociales que no pueden ser evaluados en términos económicos. Se espera que esta separación en amplias clasificaciones se haga menos común, a medida que la metodología para evaluar el impacto económico según los aspectos ambientales se haga más aceptado.

Los criterios típicos de selección de la ubicación para la clasificación técnica pueden incluir:

- Capacidad del sitio
- Gradiente del sitio
- Capacidad del sitio para ser expandido
- Costos de construcción
- Costos de acarreo (distancia y diferencia de cota)
- Dificultad en la operación estacional
- Requerimientos de infraestructura
- Costos de cierre y restauración

En forma similar, los criterios de selección del sitio para la clasificación ambiental puede incluir aspectos como:

- Proximidad a zonas de protección de flora y fauna silvestre
- Presencia de oconales
- Potencial de impacto a la flora y fauna
- Especies sensibles, amenazadas o en peligro de extinción

- Impactos visuales
- Impacto a los recursos hídricos de superficie y de sub-superficie
- Consecuencias ambientales de falla del sistema
- Impactos a recursos culturales
- Dificultad en conseguir permisos

Finalmente, los criterios de selección del sitio para la clasificación social/política incluye:

- Percepción del proyecto por gente y/o legisladores locales
- Oportunidad para el proyecto de ejecutarse en oposición a grupos ambientales
- Uso recreacional del terreno para ubicación del proyecto (es decir, caza, pesca, campamento, etc.)
- Impactos visuales
- Impactos o riesgo de impactos ambientales percibidos
- Impacto socioeconómico al área local/regional
- Valor del uso de la tierra de cada sitio después del minado

Una vez identificados los criterios para cada clasificación, se le asigna un factor ponderativo relativo a cada criterio dentro de cada clasificación. Estos factores ponderativos por lo general se establecen mediante la coordinación entre varios especialistas técnicos, particularmente considerando la clasificación ambiental. Por ejemplo, asumiendo que se utiliza una escala del 1 al 10, un proyecto particular puede asignar un peso de 5 a producir impactos a oconales (mitigables), 9 a impactos a los recursos pesqueros, 6 a impactos a las áreas de parición de mamíferos, y 3 a impactos visuales.

***Clasificación Jerárquica*** – Una vez identificados los sitios potenciales dentro de un radio razonable del cuerpo mineralizado y acordados los criterios de evaluación del sitio, se procede con el proceso de clasificación jerárquica de los sitios. Primero, cada sitio es evaluado con los criterios dados. Para cada sitio se asigna un puntaje relativo en cada criterio, muchas veces en base a una escala del 0 al 10, correspondiendo el 0 a

ningún impacto o problema y el 10 a impactos inevitables, mayores y no mitigables o impactos económicos significativos.

La clasificación técnica puede ser ordenada jerárquicamente según el costo, en un diseño a nivel de pre-factibilidad efectuados para cada sitio. Esta capacidad de calificar sitios únicamente según factores económicos es exclusiva del área técnica; los impactos ambientales y sociales por lo general no se prestan a un análisis del impacto económico – al menos ninguno que sería aceptable para el público.

La clasificación jerárquica de los criterios y la ponderación de cada criterio son utilizadas para proporcionar un resumen numérico de cada sitio, en cada amplia clasificación. La calificación general del sitio es determinada por la sumatoria de los factores que se obtienen multiplicando el peso del criterio por la calificación del sitio para dicho criterio. Más específicamente, si  $w_i$  es el peso para el criterio  $i$  y  $x_{ij}$  es la calificación para el criterio  $i$  para el sitio  $S_j$ , entonces la clasificación jerárquica del sitio  $r(S_j)$  para  $S_j$  se calcula a partir de:

$$r(S_j) = \sum_i w_i x_{ij} \quad (1)$$

Esta clasificación jerárquica del sitio puede establecerse fácilmente en un formato de hoja de cálculo de computadora, que permite una fácil jerarquización de los sitios y el uso de un análisis de sensibilidad. En términos de clasificación jerárquica, se presume que el sitio con el menor puntaje general es el “mejor” sitio. A menudo, los sitios van a tener un puesto diferente en las tres clasificaciones. En este caso, se compara cierto criterio técnico con la participación de las instituciones reguladoras y el público para elegir el sitio óptimo.

El siguiente paso en el proceso de clasificación jerárquica es efectuar un análisis de sensibilidad tanto del peso relativo dado para cada criterio como del puntaje específico del sitio que se le puso a cada sitio para ese criterio en particular. El análisis de sensibilidad es efectuado variando el puntaje o peso numérico entre los valores más altos y más bajos probables, e investigando el impacto resultante sobre la clasificación jerárquica general del sitio. Este análisis es empleado para evaluar el potencial de alterar

el proceso de selección del sitio dependiendo de los parámetros de entrada. Cualquier peso o puntaje de evaluación del sitio que impacte dramáticamente la clasificación jerárquica final del sitio deberá ser evaluado para garantizar que se elija el sitio apropiado.

Este tipo de selección del sitio conduce en gran medida a un enfoque en base al riesgo, descrito en detalle en la sección de botaderos de desmonte. Para un proceso de selección del sitio en base al riesgo, los pesos (o factores ponderativos) y los puntajes específicos del sitio pueden ser variados estadísticamente, obteniéndose el mejor sitio elegido estadísticamente. Una variación en este enfoque general es utilizar la teoría de decisión de Bayes, en la que a cada sitio se le asigna una probabilidad individual de éxito (o fracaso). La información adicional acerca del empleo de la teoría de decisión para la evaluación del sitio es contenida en Benjamin y Cornell, (1970) y Howard y Metheson (1983). Información adicional y un tratamiento más riguroso del proceso de locación se encuentra en Keeney (1980).

### **3.0 DISEÑO INGENIERIL**

Las instalaciones de lixiviación en pilas y botaderos están siempre destinadas a proteger el ambiente mientras se procesa mineral en una forma confiable y económica. Todas estas instalaciones son diseñadas con “descarga cero”, lo que significa que el sistema entero que puede contener potencialmente los residuos de proceso (sólidos o líquidos) está adecuadamente separado del ambiente mediante estructuras diseñadas.

El diseño de las instalaciones de lixiviación en pilas y en botaderos sigue normalmente dos filosofías ingenieriles básicas: diseño por *función*, y diseño por *regulación*.

En el diseño por el modo función, cada elemento de la instalación esta diseñado para cumplir requerimientos específicos del sitio y del proyecto. Para el diseño por función, cada elemento de una instalación es diseñado para permanecer funcional bajo un servicio esperado o condición de “carga”. Esta filosofía se adapta a cualquier aspecto del diseño de una instalación, tanto considerándola individualmente como dentro de un sistema. Por ejemplo, si un talud requiere ser estable bajo condiciones de carga estática o sísmica, para las propiedades del material dadas, el diseñador efectúa la evaluación



para determinar el talud máximo estable. El talud puede ser posteriormente aplanado para incorporar incertidumbre en las propiedades del material, las condiciones de carga sísmica o estática reales o la misma metodología de análisis. Esta tolerancia de contar con incertidumbres se refleja en un *Factor de Seguridad*, en análisis determinísticos.

Un método matemáticamente más riguroso y técnicamente correcto se basa en una evaluación estadística de cualquiera o todas las condiciones potencialmente variables o inciertas. A este método de diseño se le conoce como *análisis de riesgos*, en el que cada elemento (o sistema) es diseñado para producir una probabilidad requerida de rendimiento aceptable (denominada *confiabilidad*).

Los requerimientos de diseño pueden ser determinísticos o en base al riesgo, dependiendo del nivel de flexibilidad disponible para el diseño de la instalación. A menudo, los ingenieros de diseño, propietarios o personal regulador toman decisiones en base al riesgo sin estar conscientes de la base para tomar una decisión. Por ejemplo, muchas veces cuando el agua subterránea se encuentra cerca a la superficie, se requiere o diseña un sistema de revestimiento más riguroso, sin evaluar necesariamente el potencial de contaminación a ocurrir.

El diseño por regulación ocurre cuando instituciones reguladoras tratan de establecer estándares de rendimiento mínimos: por la misma naturaleza de establecer estándares, se debe fijar criterios o requerimientos de diseño rígidos para el peor de los casos que se puede esperar (o anticipar). Claramente, cada área de un proyecto presenta problemas y características únicas que deberían ser tratados, para obtener como resultado el diseño de una instalación final que cumpla con los deseos ambientales de propietarios y reguladores por igual, sin que llegue a ser excesivamente costoso.

La tendencia reguladora hoy en día es establecer estándares de rendimiento que ofrezcan seguridad pública y protección ambiental, mientras permiten que los ingenieros se participen (diseñando instalaciones únicas y específicas del sitio). Este enfoque tiene la ventaja adicional de otorgarles responsabilidad a los encargados del rendimiento de la instalación (como deber ser). Estos estándares de rendimiento consisten típicamente en metas generales de la instalación más criterios de rendimiento mínimos.

Por ejemplo, todas las instalaciones de lixiviación deben diseñarse de manera que no permitan la liberación de soluciones de proceso al ambiente. Las condiciones en las que no debe ocurrir una descarga incluyen las condiciones operativas normales y los eventos extremos. El “período de retorno” de diseño para ocurrencias extremas es definido y típicamente entendido como un evento de 1 en un año, correspondiendo a un riesgo anual de excedencia de 1 por ciento. Los eventos mayores que el evento de diseño son considerados “Casos Fortuitos”, y son aceptables desde el punto de vista de la legislación.

***Disposición General de las Instalaciones*** – Un diseño apropiado de las instalaciones de lixiviación en pilas y botaderos introduce rasgos topográficos naturales o existentes en la configuración final. En terrenos difíciles, el tipo de instalación básico puede ser dictado por el área disponible – por ejemplo, para un área escarpada se puede utilizar una técnica de construcción tipo valle, donde de lo contrario una cancha plana podría haber sido más ventajosa.

El primer paso en la disposición física de una instalación comprende determinar el tamaño requerido para un tonelaje dado de material a ser procesado. A manera de ejemplo, supongamos que el propietario de una mina había determinado mediante perforaciones exploratorias que el tonelaje de mineral probado y probable era de 10 millones de toneladas (cortas). A una densidad in-situ típica del mineral de 90 libras por pie cúbico (pcf), el volumen requerido para procesamiento es de 222 millones de pies cúbicos. Para una altura de pila estimada de 200 pies, la dimensión lateral cuadrada promedio es de aproximadamente 1100 pies, tras descomponer en factores el volumen requerido por el 10 por ciento para permitir ineficacias del talud lateral.

Las alturas máximas de la instalación de lixiviación ya sea en pilas o en botaderos se determina principalmente a partir de las propiedades químicas y físicas del mineral durante la lixiviación. Un mineral durable que no se degrada durante la lixiviación puede obviamente ser apilado a mayores alturas que un mineral aglomerado que tiende a volverse menos permeable a mayor altura, a veces a tal punto en que la recuperación se ve afectada negativamente. En la década pasada, las alturas de lixiviación se han incrementado constantemente, a medida que la industria adquiere seguridad en el rendimiento del sistema de revestimiento y en las tasas de recuperación del mineral.

Hace diez años, una instalación revestida de 100 pies de alto era el límite típico de seguridad; actualmente, son comunes alturas de 300 pies y varias alturas se encuentran en la fase de diseño y planeamiento con cerca de 700 pies.

El supuesto crítico en este cálculo es la densidad seca del mineral que es residente en el área de la cancha. Los valores típicos fluctúan entre 70 y 110 pcf, dependiendo tipo de material y su aglomeración, de haberla. Un enfoque razonable es estimar la densidad del mineral durante las etapas de diseño preliminar o a nivel de factibilidad, y refinar el estimado con el uso de pruebas de columna durante el diseño final.

Una refinación en el cálculo de los requerimientos de tamaño de la cancha y las configuraciones de su disposición general asociadas es evaluar el potencial de un enfoque de construcción en fases. Si una instalación va a procesar mineral de una mina por un período de varios años, tiene poco sentido técnico y económico construir completamente la instalación. Un enfoque más común es manejar los desembolsos de gastos de capital, mientras se construye la instalación en forma gradual. La duración o longitud entre los ciclos de construcción varía, dependiendo en primer lugar de los costos de movilización y/o desmovilización, siendo dos años un período típico. Menos de dos años restringe severamente a los operarios a un cronograma rígido; más de dos años representa un desembolso de una cantidad considerable de capital antes de que se necesite.

La disposición civil de las instalaciones del proyecto incluyen un área de la cancha e instalaciones auxiliares, que incluyen estructuras de derivación, carreteras y pozas de recolección de la solución. Un diseño eficiente de toda lucha por minimizar los costos de construcción, generalmente como resultado de los volúmenes y costos de construcción.

Un diseño tipo cancha plana debe ser limitado por los taludes disponibles en los que se va a construir el área de la cancha. Los taludes típicos varían entre 1 y 8 por ciento aprox. en niveles generales. Un talud de menos del 1 por ciento empieza a presentar problemas de control de calidad para el contratista de construcción, y puede tener como resultado pozas inadvertidas dejadas en la cancha interior. Pendientes mayores al 8 por ciento resultan muchas veces en la inestabilidad del talud, amenos que se efectúen otras

medidas de mitigación tales como el reforzamiento con bermas, el aplanamiento del área del pie o el talud exterior, o el incremento de la resistencia al rozamiento del sistema de revestimiento en el área del pie aguas abajo.

Tanto el diseño tipo relleno de valle como el tipo cancha deben limitarse a los taludes interiores máximos de 3 a 1 (horizontal a vertical), a menos que se empleen técnicas de construcción especiales. Este límite de 3 a 1 ha sido establecido para permitir la adecuada instalación de un revestimiento de geomembrana, sin causar problemas indebidos con la construcción de la subrasante o la colocación de la geomembrana.

***Diseño del Sistema de Revestimiento*** – Como ya se señaló anteriormente, el diseño apropiado del sistema de revestimiento es decisivo para el rendimiento de la instalación de lixiviación en pilas o botaderos. La falla del sistema de revestimiento representa el efecto potencial compuesto de una seria degradación ambiental y la pérdida potencial de soluciones valiosas. Por ello, es interés de todos proporcionar un sistema de revestimiento que funcione como se desea – es decir, que contenga totalmente las soluciones, mientras mantiene su funcionalidad bajo el rango esperado o las condiciones operativas y la vida útil.

El enfoque empleado aquí se basa en un análisis de sistemas (sin duda la función de una barrera de contención depende de que cada pieza del sistema trabaje como se diseñó). Este enfoque de los sistemas introduce el material de cobertura, la capa de reducción de la cabeza hidráulica, revestimiento primario y secundario, capas de detección de fugas y los drenes inferiores como un único sistema de trabajo.

La mayoría de normas actuales, si no todas, exigen el uso de un revestimiento de geomembrana como parte del sistema de revestimiento. Como se señaló en la sección previa sobre riesgo, la redundancia o confiabilidad de un sistema de revestimiento típicamente incluye algunos criterios de valor de instituciones reguladoras que están dictando la tecnología de diseño mínima aceptable.

El “mejor control de tecnología disponible” (BACT) incorpora el uso de sistemas de revestimiento compuestos, en los que un revestimiento de geomembrana se encuentra en contacto directo e íntimo con un revestimiento de suelo de baja permeabilidad

subyacente. Este revestimiento compuesto ha demostrado reducir el derrame esperado en aproximadamente 10,000 veces en comparación con un revestimiento de geomembrana sobreyaciendo a una capa de detección de fugas o una subrasante permeable.

El material de cubierta que es colocado entre el revestimiento de geomembrana superior y el mineral a ser procesado es determinante para el éxito de la construcción del revestimiento sin causar daños, mientras se minimiza la cabeza hidráulica sobre el revestimiento subyacente. El tipo y espesor de la capa de cubierta son determinados por el tamaño y la angulosidad del material a ser utilizado para la construcción de la cubierta, el tipo de geomembrana y el tipo de equipos de construcción a ser utilizados para colocar el material de cubierta. Los espesores típicos son 24 pulgadas para menos 1 pulgada de material de cubierta colocado con tractores sobre polietileno de alta densidad (HDPE) de 60 mil (milipulgadas). Por lo general se recomienda ensayos de campo a gran escala para probar o refutar una colocación de material de cubierta antes de utilizarlo sobre toda la instalación.

Uno de los asuntos claves en el diseño de un revestimiento es la selección de un tipo de geomembrana y un espesor asociado. Existen muchos documentos típicos que sirven como guía a los ingenieros para la selección de geomembranas.

La guía básica para la selección de un tipo de geomembrana debe hacer que haya correspondencia entre las propiedades del material y los requerimientos del proyecto. No hay ningún tipo de revestimiento simple que constituya la mejor geomembrana posible bajo todas las condiciones. Los tipos más comunes de geomembrana son el polietileno de alta densidad (HDPE), el polietileno de baja densidad (VLDPE) y el cloruro de polivinilo (PVC). El HDPE es por lo general considerado la geomembrana más resistente a la luz solar y a la exposición química. El HDPE es menos flexible que el VLDPE y el PVC, haciéndolo menos resistente a la punción y más susceptible al deslizamiento. Contrariamente, se ha demostrado que el PVC y el VLDPE se degradan rápidamente en condiciones expuestas, requiriendo el tratamiento social o la autorización de superficies expuestas.

El monitoreo del rendimiento del sistema de revestimiento compuesto puede lograrse con una variedad de técnicas incluyendo las capas de detección de fugas subyacentes y los revestimientos secundarios asociados, pozos de monitoreo, lisímetros, medidores de gas de cianuro de hidrógeno, y técnicas eléctricas.

***Balance de Agua*** – La modelación apropiada del balance de agua es crítica para una operación ambientalmente aceptable de una instalación de lixiviación en pilas y en botaderos. Como se indicó, todas esas instalaciones están diseñadas para operar bajo eventos normales y extremos sin descarga al ambiente. Estas instalaciones de descarga cero deben contener totalmente las soluciones normales y en exceso que resulten de eventos extremos.

Como la mayoría de instalaciones están expuestas a los elementos, se debe tener cuidado en “equilibrar” la cantidad de agua requerida en el proceso con la cantidad de agua que ingresa o sale del sistema. Puede requerirse agua de reposición en regiones secas en donde la evaporación neta sobrepasa a la precipitación y crea un balance de agua deficitario.

Contrariamente, un balance de agua excedente puede ocurrir en regiones o climas húmedos donde una parte considerable de la precipitación o deshielo de nieve anual se concentra en una estación o en tormentas aisladas. Particularmente en el caso de las situaciones de exceso, un planeamiento estratégico debe introducir medidas de manejo de fluidos que eviten la formación de soluciones excesivas a tal punto en que se pierda el almacenamiento de emergencia u ocurra una descarga incontrolada.

La Figura 2 es un diagrama esquemático del ciclo hidrológico de agua que es típico para las instalaciones de lixiviación.

Los modelos en computadora son empleados comúnmente para predecir los balances de agua deficitarios o excedentes en un año y a lo largo de la vida del proyecto. Estos modelos utilizan un enfoque realista en base a los sistemas de los cálculos del balance de agua y son establecidos para permitir al ingeniero u operario calibrar el modelo con respuestas del sistema actual durante las operaciones, permitiendo así que el modelo sea la “mejor” herramienta posible de manejo de fluidos, prediciendo las respuestas futuras

del sistema y permitiendo que se efectúen medidas operacionales antes de que la situación se torne crítica.

Los modelos del balance de agua predicen las influencias climatológicas estadísticas y la variabilidad del material en las instalaciones de contención en base a datos históricos de la región o el sitio y las proyecciones operacionales. Esto ayudará al cliente a determinar cuánta agua se necesitará para el proceso, y producirá predicciones del flujo para medidas de control tales como almacenamiento, intensificación de la evaporación, y tratamiento y descarga.

La ecuación básica para establecer un modelo de balance de agua se basa en las máximas áreas revestidas de la poza y de proceso para cada fase, cuantificando el agua probable ganada por la precipitación, la pérdida de agua en evaporación y el agua retenida en la matriz de material. La ecuación es la siguiente:

$$S_{in} + P + OM_{del} = S_{out} + E + OM_{fc} + \Delta S \quad (2)$$

donde:

$S_{in}$ = el flujo de solución aplicado durante el procesamiento primario o secundario (incluye el agua de reposición)

$P$ = la precipitación que cae directamente sobre las áreas revestidas

$OM_{del}$ = el contenido de humedad del material depositado en las áreas revestidas

$S_{out}$ = el flujo de solución que se espera retorne del área de lixiviación (solución de lixiviación)

$E$ = pérdidas de evaporación y evapotranspiración de las áreas de procesamiento activas e inactivas y de las pozas.

$OM_{fc}$ = el contenido de humedad del material a la capacidad de campo después del procesamiento

$\Delta S$ = cambios en el volumen de almacenamiento

Hay dos técnicas analíticas para las predicciones del balance de agua: la determinística (parámetro fijo) y la probabilística (parámetro variable).

Los modelos determinísticos introducen condiciones mensuales y operacionales tales como:

- Cambios en las tasas de disposición de material, contenido de humedad entrante y tipo de material.
- Condiciones de evaporación mensual actual (inactivas) y superficies de pozas y desechos activos.
- Condiciones de precipitación mensual actual (caída pluvial, nevada, lluvia o nieve).
- Adiciones de construcción en fases a las áreas de contención revestidas.
- Cambios en las tasas de aplicación del rociador de superficie y áreas de superficies mojadas .
- Ajustes en las aplicaciones del rociador o emisor de goteo para pérdidas de evaporación incrementadas o reducidas.
- Infiltración/retardo observado, calculado o medido de precipitación y de flujos de soluciones a través del material estéril.
- Marcos de tiempo para unidades de manejo de desechos inactivas, deslavadas, restauradas o cerradas.

El enfoque probabilístico permite una simulación más avanzada, en comparación con el enfoque determinístico, y es valiosa para mejorar las predicciones de los efectos del promedio así como las condiciones climáticas extremas secas y húmedas para operaciones y cierre.

La variabilidad estadística de las condiciones climáticas para precipitaciones y evaporación se basa en las funciones de distribución de probabilidades de la fecha meteorológica en las proximidades del sitio. Este modelo puede predecir en forma más precisa los requerimientos de agua de reposición para la instalación y puede verificar las capacidades de diseño requeridas de la poza de almacenamiento de tormenta para análisis del peor de los casos tales como lluvia o nieve durante el ciclo de un año húmedo.



Además de las variaciones climáticas mensuales, el enfoque probabilístico puede explicar las variabilidades en las propiedades proyectadas del material estéril.

Generalmente, las instalaciones de lixiviación funcionan aplicando solución en la parte superior de la instalación, recolectando el drenaje a gravedad o “lixiviado” en una tubería subyacente que transfiere esta solución de lixiviación a las pozas o sumideros de recolección revestidos. Estas pozas están diseñadas para contener el volumen operativo normal más una tolerancia para condiciones alteradas tales como pérdidas de energía, más una tolerancia para tormentas.

El volumen operativo normal está compuesto por un rango de profundidades sobre las que las bombas pueden operar, combinado con la variación diaria, mensual y estacional esperada. Por ejemplo, muchas veces las instalaciones de gran tamaño requieren de pozas de almacenamiento de solución de lixiviación diseñadas para una acumulación de soluciones que alcanzan el pico varios años en el futuro.

Las tolerancias de volumen para cortes de energía permiten el almacenamiento de emergencia en caso de que sea interrumpido el abastecimiento eléctrico entrante o que ocurra una falla mecánica del sistema de bombeo. Este volumen es comúnmente bastante grande, dadas las tasas de flujo de solución que salen del área de lixiviación. Por ejemplo, si se espera que las condiciones alteradas duren menos que 24 horas para una tasa de flujo de 2500 gpm, el volumen de almacenamiento de emergencia requerido es de casi 500,000 pies cúbicos. Cabe señalar que el volumen de almacenamiento de emergencia se suma a los requerimientos de volumen de almacenamiento de tormentas – dado que los cortes de energía mucha veces ocurren durante tormentas intensas.

Los requerimientos de almacenamiento de tormenta o eventos extremos se basan por lo general en una tormenta de 24 horas en 100 años. Este período de retorno es equivalente a un riesgo anual de excedencia de 1 por ciento y es consistente con la confiabilidad de otras partes de la instalación. La fuente de estimados para esta tormenta es o bien los mapas regionales generales, como los disponibles de la NOAA (Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica), o bien un análisis específico del sitio en base a las estaciones de aforo meteorológico cercanas.

La precipitación de eventos de tormenta impacta la conducción de solución y los sistemas de almacenamiento mediante dos mecanismos: escorrentía e infiltración. La escorrentía de la precipitación por lo general se encuentra en un rango de 10 a 30 por ciento de la precipitación total para las áreas de lixiviación, y produce un impacto relativamente rápido al sistema. La contraparte de la precipitación es la infiltración, que fluye hacia abajo a través del material de lixiviación, que sale en un momento posterior. El flujo proveniente de la infiltración es atenuado en forma significativa, resultando en mayores flujos en un largo período de tiempo. La sabiduría convencional sugiere períodos de retardo de 1 a 3 semanas o más por 100 pies (vertical) de material de lixiviación. El período de amortiguación real, que es la demora entre la escorrentía pico y el flujo de solución de lixiviación pico, es dependiente del tipo de material, el tamaño, las condiciones de humedad de campo, la permeabilidad y la estratificación. Generalmente, las compañías desarrollan un estimado del tiempo de amortiguación a partir de las condiciones específicas del lugar durante las operaciones, aunque hay varios modelos de computadora disponibles para ayudar a refinar el estimado.

La ventaja del almacenamiento provisional de la solución en la pila como resultado de la infiltración es que el volumen de almacenamiento de tormentas puede reducirse considerablemente, si se emplea técnicas de manejo de fluidos para anticipar y ocuparse del caudal de tormenta faltante. Por ejemplo, la capacidad de bombeo excedente puede ser utilizada para aplicar el exceso de solución a áreas de lixiviación inactivas hasta que el sistema se encuentre nuevamente en equilibrio, o las soluciones puedan ser trasladadas a otros sistemas de contención tales como las canchas de relaves hasta que se logre un equilibrio del sistema.

***Estructuras de Derivación*** – Todas las instalaciones de contención requieren tener estructuras de derivación aguas arriba que deriven la escorrentía alrededor de la instalación. Por lo general, esta derivación debe mantener un balance de agua controlable y razonable dentro de los límites de descarga cero.

Las estructuras de derivación, que generalmente están compuestas por sistemas de zanjas y canales, están diseñadas para derivar los flujos que resultan de tormentas especificadas. Estos eventos de tormenta de diseño son especificados típicamente por las instituciones reguladoras, y pueden variar desde una tormenta de 24 horas en 25

años hasta la máxima avenida probable – verdaderamente una amplia gama de posibilidades. Este amplio rango refleja un desacuerdo general entre los reguladores con respecto a los enfoques razonables a ser empleados en el diseño hidrológico. Un enfoque técnico razonable sería seleccionar un período de retorno o nivel de confiabilidad utilizado para todas las partes del diseño de la instalación – por ejemplo, el evento de 100 años que es utilizado para los modelos de contención de solución y balance de agua y para un evento sísmico de diseño.

Todas las estructuras de derivación deben ser diseñadas para ser estables, evitando la erosión que conduciría ya sea al mantenimiento o a la falla. La estabilidad erosional está muy en función de la velocidad del agua, la geomorfología y la variación entre los flujos promedio y pico. Un buen enfoque para el diseño de la estructura de derivación es seleccionar un nivel y sección de canal que minimice la erosión durante eventos de tormenta de diseño. Se espera que esta sección de canal experimente cierta sedimentación durante los eventos promedio, pero será de autolimpieza durante flujos mayores. Este enfoque de diseño es especialmente crucial si la estructura va a proporcionar una derivación a largo plazo después del cierre de la instalación.

***Asentamiento del Terreno de Fundación*** – Las instalaciones de lixiviación en pilas y botaderos normalmente imponen cargas estáticas sobre el terreno de fundación o la subrasante que sobrepasan las cargas históricas o geológicas. El único caso en el que este no sería normalmente el caso sería en áreas que en algún momento estuvieron cubiertas por glaciares.

El resultado de estas nuevas cargas estáticas es que los suelos que subyacen a la instalación de lixiviación se comprimen, en una forma similar a una compresión de primavera. En mecánica de suelos, esta compresión es denominada “consolidación”. Incluso las áreas que han sido previamente cargadas experimentarán alguna consolidación, debido al rebote que ocurrió cuando se removió la carga; p.ej., deshielo de glaciares.

En áreas donde la subrasante del terreno de fundación es homogénea en dirección lateral, el asentamiento será uniforme, variando de casi cero en el área del pie a un

máximo aproximadamente debajo de la cresta del relleno, en el punto de la carga vertical máxima.

El análisis de la cantidad de asentamiento que puede esperarse se basa en ensayos de laboratorio de la respuesta de consolidación de cada horizonte de suelo en el terreno de fundación. Se cuenta con varias ecuaciones para predecir este asentamiento, dependiendo del tipo de suelo encontrado. Los suelos permeables como las arenas y gravas experimentan asentamientos inmediatamente después de la carga, denominada “asentamiento primario” en mecánica de suelos. Las arcillas y otros suelos menos permeables experimentan tasas de asentamiento que dependen en gran medida de la permeabilidad del material – por ello, la consolidación es controlada por cuán rápido la humedad en la matriz del suelo puede alejarse a medida que las partículas de suelo tratan de acercarse. Para una referencia más completa acerca de la teoría de consolidación, el lector puede consultar Lambe y Whitman (1969).

Para los estratos básicos literalmente homogéneos, el asentamiento por lo general no constituye un problema. Los dos temas de relativamente menor importancia a evaluar son: si el talud del pie a la cresta va a invertir la pendiente al punto donde las soluciones están empozadas permanentemente bajo el material de lixiviación, y si el asentamiento diferencial entre el pie y la cresta va ser lo suficientemente alto como para exceder las propiedades elásticas del revestimiento de geomembrana. Si el talud exterior pendiente abajo es mantenido en un mínimo de 1 por ciento, es de difícil a improbable que ocurra una inversión. Por supuesto que esto supone que un terreno de fundación relativamente competente, que se requerirá para fines de estabilidad del talud. En forma similar, la elongación desde el área de asentamiento cero hasta la de asentamiento máximo es improbable con cualquier tipo de geomembrana, ya que la elongación diferencial a lo largo de toda la longitud es trivial.

El asentamiento se hace más importante cuando existen condiciones no homogéneas debajo del área cargada. Condiciones que pueden resultar en una rápida variación de las condiciones de asentamiento bajo distancias cortas incluyen el cruce de una estructura de falla, suelos colapsables y depósitos eólicos. Cada una de estas condiciones puede resultar en serios asentamientos diferenciales que pueden conducir a la falla del revestimiento, por lo que deben ser cuidadosamente investigados y evaluados. Las

técnicas para evaluar el asentamiento diferencial sigue los principios básicos descritos anteriormente.

***Estabilidad de Taludes*** – Durante el diseño y la disposición física de las instalaciones de lixiviación, los ingenieros deben seleccionar taludes exteriores estables. Esto se hace aun más crítico cuando se utilizan materiales de geomembrana como revestimiento, porque el material de geomembrana tiene efectos perjudiciales sobre la estabilidad general del talud, y ya que el movimiento del talud va a producir la ruptura de un material de geomembrana conduciendo a una falla de contención.

Para ser estables, los taludes deben presentar resistencias de material de una magnitud suficiente como para resistir el movimiento de la cara exterior para la geometría seleccionada, bajo condiciones tanto estáticas como de carga sísmica.

La inestabilidad del talud puede manifestarse en muchas formas, que van desde un simple desmoronamiento en el borde y un deslizamiento cerca de la superficie (falla de talud infinito) hasta movimientos mayores y más serios ubicados a profundidad (Circular, no circular, cuña). El desmoronamiento de los taludes exteriores es normalmente aceptable en operaciones activas como una lixiviación en pilas o en botaderos, pero es inaceptable una vez que se alcanza una configuración supuestamente estable y final. Los mecanismos de falla del talud más serios son inaceptables, ya que representan una falla o brecha mayor en el sistema de contención y muchas veces el material es transportado fuera de los límites de la instalación.

La Figura 3 muestra los planos de falla para mecanismos de talud infinito, circular y de cuña. En cada caso, la falla ocurre cuando la fuerza motriz general sobrepasa a la capacidad de la estructura de resistir el movimiento. El factor de seguridad (FS) se define como la relación entre las fuerzas de resistencia y las fuerzas motrices o actuantes, con un FS crítico igual a la unidad.

Las fallas del talud están frecuentemente relacionadas a los errores del operador de la instalación, cuando un talud es construido bajo condiciones no anticipadas por el diseñador. Ejemplos comunes son cuando una instalación revestida es cargada (se le coloca material) en una dirección cuesta abajo, en o cerca del ángulo de reposo, y

cuando se hacen modificaciones al diseño en el campo sin consultar al ingeniero que realizó el diseño original.

Las normas y el sentido común dictan que un FS mínimo mayor que 1 debe ser empleado para diseñar estructuras que involucran taludes, en un intento por proporcionar instalaciones seguras y servibles en un período de vida predeterminado y bajo diversos criterios de carga y utilización. Los factores de seguridad comunes mínimos para instalaciones de lixiviación son 1.3 para condiciones de carga estáticas y 1.0 para condiciones sísmicas (Harper, 1987). El caso estático es cuando la fuerza que causa, o trata de causar, movimiento del talud es atribuible al peso del material que está siendo movilizado. El caso dinámico o de sismo es cuando el talud es sometido a una aceleración cíclica horizontal y/o vertical.

La mayoría de problemas de estabilidad asociados a geomembranas se encuentran o bien dentro del modo de falla de talud infinito o bien tipo cuña, ya que el plano de falla sigue parcialmente a la geomembrana. La geomembrana representa una discontinuidad débil en la masa de la estructura, y puede tener ángulos de fricción excesivamente bajos.

Las fallas comunes del talud también están limitadas a los modos de talud infinito o de cuña, ya que típicamente se evitan problemas de estabilidad asociados a fundaciones débiles y/o saturadas (debajo de la geomembrana), debido a la presencia de la geomembrana. Adicionalmente, en una operación típica, se minimiza las cabezas hidráulicas directamente sobre el revestimiento, y se evita la influencia de una superficie freática sobre el material del talud.

En general, los análisis de estabilidad del talud que comprenden las instalaciones de lixiviación en pilas y botaderos están en función de:

- Características del material del mineral (fricción, cohesión, peso específico, altura)
- Resistencia al corte de la interface suelo/geomembrana
- Propiedades del material de fundación
- Talud del terreno natural
- Talud de la cara exterior

- Ubicación de la superficie freática
- Condiciones de carga (estática, sísmica)

La lista de parámetros de entrada de estabilidad pueden reducirse si no se incluye las propiedades del suelo de fundación y si se asume que la superficie freática cerca al talud exterior de la cancha es insignificante, especialmente cuando las capas de drenaje de la cabeza hidráulica están incluidas en el diseño.

Un supuesto simplificador final es que el material del mineral presenta pocas o ninguna característica cohesiva. Esta hipótesis es bastante razonable, ya que la mayor parte del mineral es granular, débilmente consolidado y presenta una fracción relativamente pequeña del material de arcilla.

Con estos supuestos simplificadores, la lista de parámetros de ingreso es:

- Características del material mineral (fricción, cohesión, peso específico, altura)
- Resistencia al corte de la interface suelo/geomembrana
- Talud del terreno natural
- Talud de la cara exterior
- Condiciones de carga (estática, sísmica)

Cada uno de estos parámetros de estabilidad es específico del sitio – y o bien puede ser ensayado en aparatos de laboratorio o bien está en función de las propiedades del sitio. El parámetro clave poco común en esta lista es la fricción de la interface del sistema de revestimiento sintético. Esta fricción puede variar de un nivel bajo de 4 grados a un nivel alto de 20 grados (+/-), dependiendo del sistema que se esté utilizando y de las propiedades del material circundante. La Tabla 1 es un resumen de la resistencia al corte de la geomembrana para varios tipos de materiales. Se ha tenido amplia libertad para agrupar los materiales en clasificaciones generales; específicamente métodos de ensayo y tipos de material (arcillas, arenas, gravas).



**Tabla 1** Resumen de Ensayos de Resistencia al Corte

<b>Contacto</b>		<b>Ensayos de Corte Directo</b>			Húmedo/Seco	AF del material
Geomembrana	Contacto	Ángulo de Fricción		(prom.)		
		(mín.)	(máx.)			
Geotextil	Arcilla	10	14	12	Seco	
Geotextil	Geomalla			20	Húmedo	
HDPE	Arcilla			13	Húmedo	25
HDPE	Arcilla			12	Húmedo	35
HDPE	Arcilla	14	25	19.5		20
HDPE	Arcilla	11	14	12.5	Seco	
HDPE	Arcilla	9	11	10	Húmedo	
HDPE	Arcilla			9	Húmedo	28
HDPE	Geomalla	5	8	6.5	Húmedo	
HDPE	Geotextil			30.5		
HDPE	Geotextil			32		
HDPE	Geotextil	8	10	9	Húmedo	
HDPE	Geotextil	9.5	12.5	11	Seco	
HDPE	Geotextil			9	Húmedo	
HDPE	Grava			22		36
HDPE	Grava			21	Húmedo	
HDPE	Grava			14	Húmedo	
HDPE	Grava			16	Húmedo	31
HDPE	HDPE	6	13	9.5	Seco	
HDPE	HDPE	6	11	8.5	Húmedo	
HDPE	Arena			6.5		
HDPE	Arena	17	18	17.5	Húmedo	26
HDPE	Arena	18	25	21.5	Húmedo	
HDPE	Arena	19	27	23		38
PVC	Arcilla	19	23	21		20
PVC	Arcilla			35	Húmedo	33.5
PVC	Geotextil			24.5		
PVC	Grava			25		36
PVC	Grava			20	Húmedo	31
PVC	Grava			38		
PVC	Arena	26	33	29.5		38
PVC	Arena			38	Húmedo	39
PVC	Arena			19	Húmedo	
PVC	Arena			33		30
PVC	Arena	32.5	35.5	34	Húmedo	
PVC	Arena	21	27	24	Húmedo	26
PVC	Arena			38.5	Seco	39
PVC	Limo			30	Húmedo	29
VLDPE	Arena			28	Húmedo	
VLDPE	Arena			34	Húmedo	30
VLDPE	Arena			28	Húmedo	
VLDPE	Arena			24	Seco	
VLDPE	Limo			30	Húmedo	29

Se ha llegado a varias conclusiones a partir de estos datos. Es aparente que las membranas más flexibles resultan en mayores resistencias al corte, probablemente debido a la deformación a material granular durante el corte. En segundo lugar y de mayor importancia, la variabilidad de los resultados de los ensayos es extremadamente amplia, aun entre tipos de material similares. Por ejemplo, la fricción interfacial



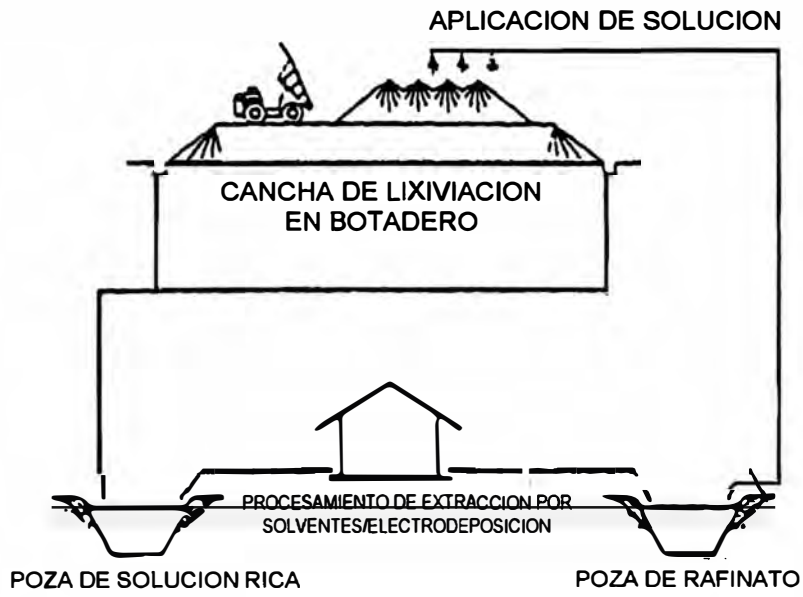
HDPE/arena varió entre 6 y 27 grados, dependiendo enormemente en gran medida del investigador. La conclusión primaria de este resumen es que para estructuras críticas, se debe ensayar el ángulo de fricción de la interface actual.

La Figura 4 es un nomograma generalizado de la estabilidad del talud para una caso HDPE-arcilla. El eje horizontal representa el nivel o talud de la subrasante, que es el ángulo sobre el cual ocurre el estiramiento en la geomembrana. El eje vertical es el ángulo de fricción del material mineral que sobreyace a la geomembrana. Se asume un ángulo de fricción de 13 grados para la interface de la geomembrana. Las líneas inclinadas del gráfico representan varios taludes de cara exterior que son considerados estables bajo un FS mínimo de 1.3, con taludes aceptables cada vez más empinados hacia arriba y a la izquierda. Por ello, para un material en el que el mineral tiene un ángulo de fricción general de 36 grados, en un talud de 4 por ciento, el talud exterior máximo es de 2.6 a 1 (horizontal a vertical).

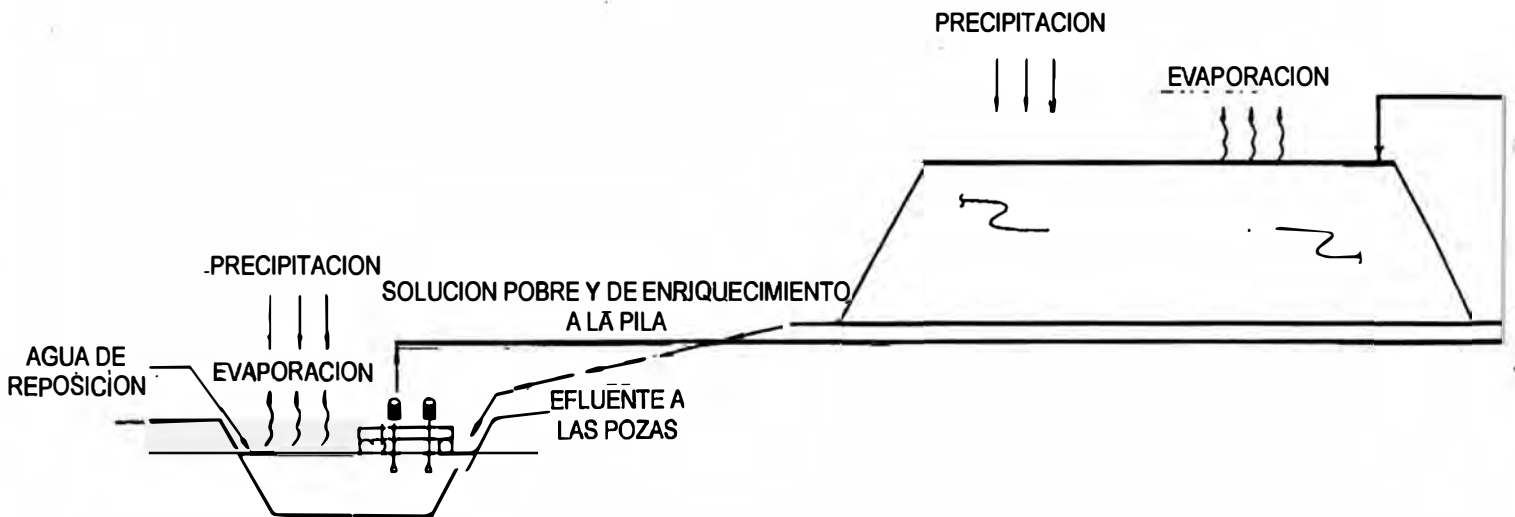
La Figura 5 es un nomograma similar, para el caso HDPE-arena, donde un ángulo de fricción promedio de la interface es de 17 grados. En este caso más estable, para las condiciones asumidas que se señalan en el párrafo anterior, el talud exterior es estable en 2.1 a 1.

Estos nomogramas han sido provistos para ilustrar el efecto de los ángulos de fricción en el talud exterior final de una instalación de contención revestida con geomembrana. No están destinados a reemplazar un programa geotécnico amplio, pero pueden ser usados para fines de factibilidad.

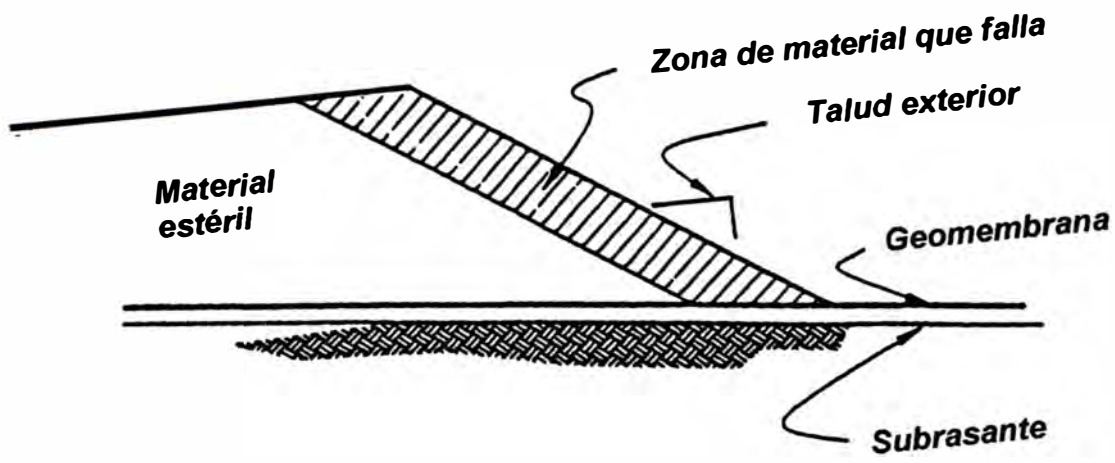
[Texto traducido de *Heap and Dump Leach Design*, M.E. Henderson, Mining Environmental Handbook – Imperial College Press]



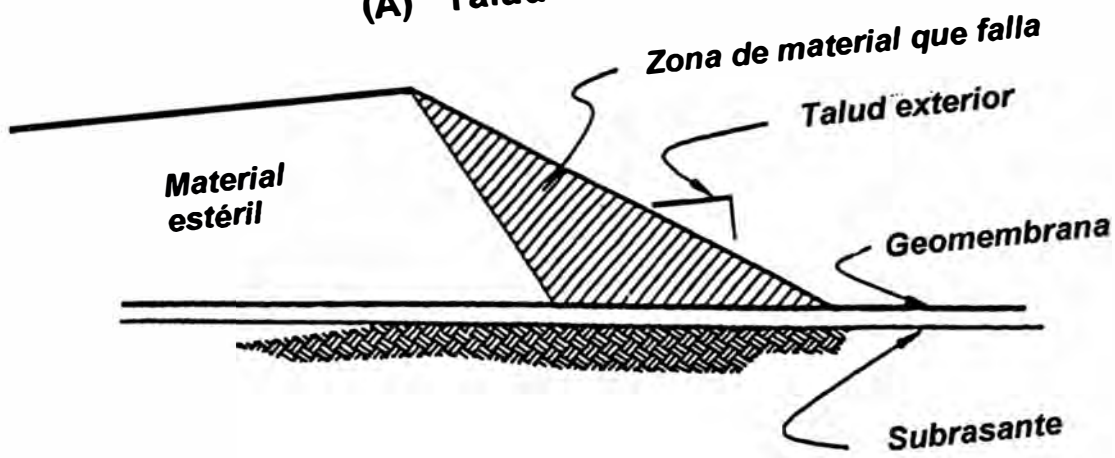
**Figura 1 Esquema Sistema típico de lixiviación en botaderos**



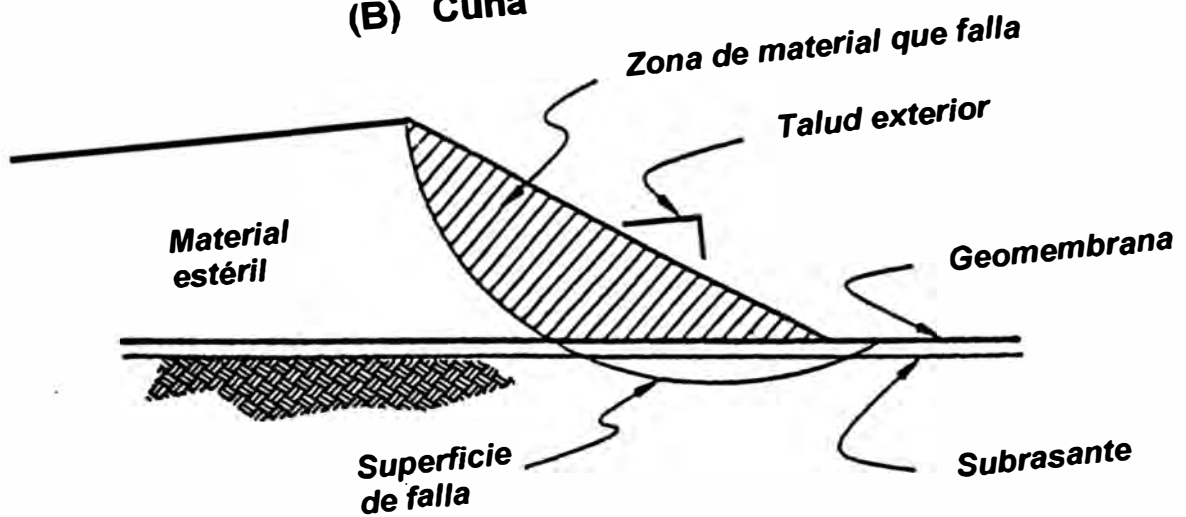
**Figura 2 Esquema: Ciclo hidrológico del agua**



(A) Talud Infinito

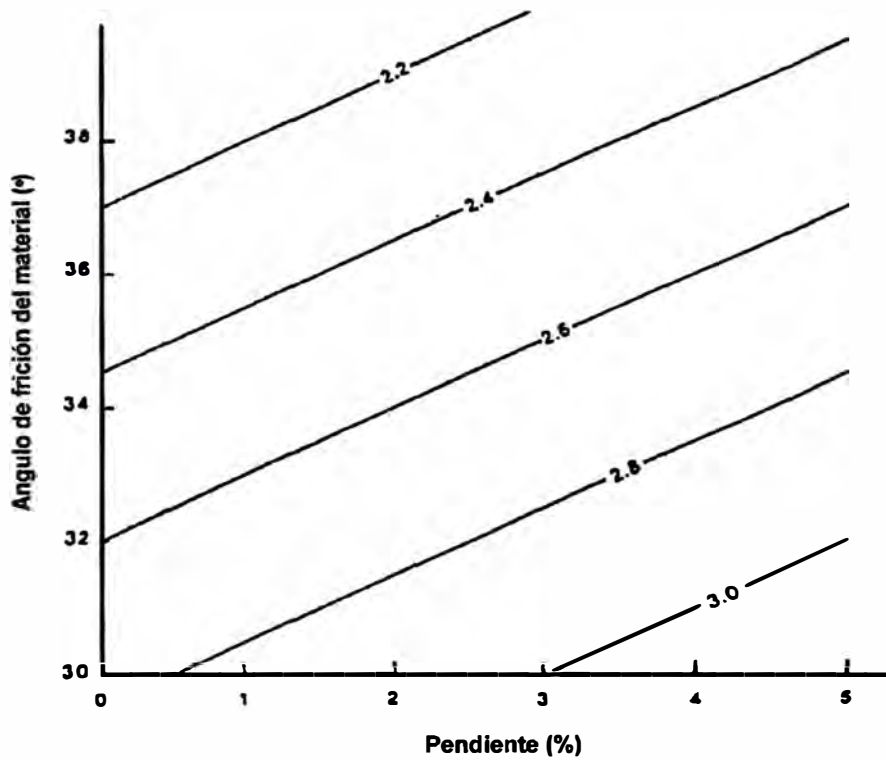


(B) Cuña



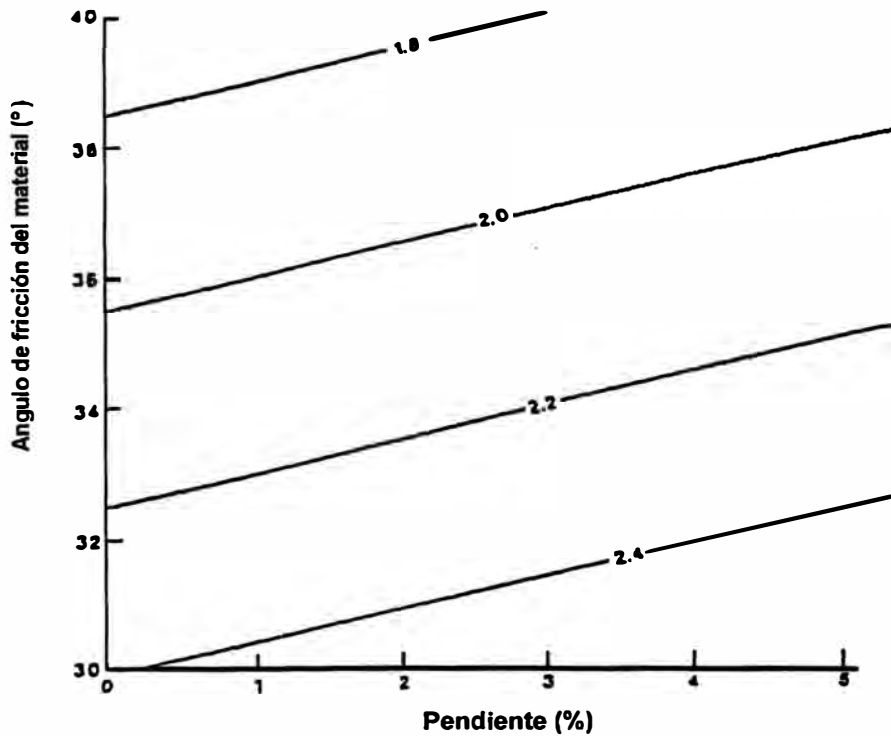
(C) Circular

Figura 3 Planos de falla: talud infinito, cuña, circular



NOTAS: (1) FS = 1.30 (Sólo caso estático)  
 (2) Angulo de fricción de la interface = 13°  
 (3) Los taludes dados son de dimensión horizontal a 1 vertical

Figura 4 Nomograma de estabilidad de talud (HDPE-Arcilla)



NOTAS: (1) FS = 1.30 (Sólo caso estático)  
 (2) Angulo de fricción de la interface = 17°  
 (3) Los taludes dados son de dimensión horizontal a 1 vertical

Figura 5 Nomograma de estabilidad de talud (HDPE-Arena)

## CONSTRUCCION DE PAD DE LIXIVIACION EN PILAS

### 1.1 INTRODUCCION

Esta sección introduce el proceso constructivo de un Pad de lixiviación en pilas y se basa en la experiencia desarrollada durante los últimos años, en los cuales la lixiviación se ha convertido en una importante técnica de procesamiento de mineral.

Debemos indicar que la construcción de un PAD puede hacerse por etapas, pudiendo entrar en operación en forma escalonada, la primera etapa de un PAD puede estar en carguío mientras que la segunda etapa puede estar en construcción. Esto dará mas flexibilidad a la operación en cuanto a la inversión del capital.

Para proceder a la construcción de un sistema de PAD de lixiviación en pilas, necesariamente debe contarse con el Estudio completo (Expediente Técnico), el cual incluye los Planos del Proyecto, Memoria Descriptiva, Especificaciones Técnicas, Presupuesto de Obra, Cronograma de avance de Obra, Relación de Materiales y Equipo a utilizarse en la construcción respectiva.

Siguiendo las recomendaciones dadas en el Expediente Técnico y con una buena Supervisión de obra, no debe haber problemas en la construcción del PAD y de todo el sistema.

El estudio tambien debe contener dos aspectos importantes, como son el balance de agua y el diseño del sistema de liners, estos tienen un efecto económico y ambiental significativos en el éxito de cualquier operación.

La secuencia de construcción está dada básicamente por las siguientes actividades:

Desbroce de material orgánico

Desbroce de material no apto para consolidación

Acarreo y eliminación de material desbrozado.  
Material de relleno para consolidación.  
Nivelación y compactación de terreno.  
Instalación de geomembrana.  
Instalación de tuberías de recolección.  
Capa de protección.  
Carguío de PAD por pilas.  
Construcción de zanjas, canales y bermas de protección.

## **1.2 DESBROCE DE MATERIAL ORGÁNICO (TOP SOIL)**

Para proceder al desbroce del material orgánico, previamente se debe conocer los botaderos a donde debe ir dicho desbroce. El material orgánico normalmente tiene un espesor que varía de 0.40m a 1.00m y es la primera capa que debe retirarse del área a ocupar por el PAD.

Si no hay caminos de acceso estos deben construirse previamente para el paso de la maquinaria y volquetes. El cálculo del equipo que se requiere en esta actividad, se hace en base al volumen de material a remover. El top soil o material orgánico se lleva a un botadero especial de tal manera que se pueda reutilizar en el futuro.

El desbroce se realiza con tractor, acumulándolo hacia los laterales del camino para facilitar el carguío. El carguío se realiza con cargador frontal y volquetes, en las cantidades calculadas para el movimiento de top soil diario a cargar.

Para un control de costos de maquinaria y equipo, diariamente se debe controlar las horas máquinas trabajadas y el número de viajes de cada volquete hacia el botadero, de tal manera de poder determinar el volumen de material movido en el día y cuánto representa en costo.

### **1.3 DESBROCE DEL MATERIAL NO APTO PARA CONSOLIDACIÓN**

Luego del desbroce del top soil, se procederá al desbroce del material no apto para consolidación, normalmente encontramos arcillas saturadas de agua, limos y otros materiales que deben ser retirados para su reposición con material bueno.

Las alturas de corte de este material se deben hacer en base a los planos del proyecto, y al estudio geotécnico de la zona. En los planos de corte transversal y perpendicular a la zona del PAD, se debe visualizar la cantidad de corte y relleno que hay que realizar en cada tramo. Uno de los problemas más graves en este trabajo es el de encontrar se con zonas fangosas que no permiten el trabajo de la maquinaria, por lo que hay que construir drenajes y enrocar dichas zonas.

La altura de corte de este material no apto puede varia de 0 m. a 2 ó 3 m. dependiendo de lo encontrado en el terreno y de acuerdo a lo indicado en planos.

### **1.4 ACARREO Y ELIMINACION DE MATERIAL DESBROZADO**

El material orgánico debe ser traslado hacia un botadero especial ya que este servirá para ser reutilizado al cierre del PAD. Es por esto que este botadero debe estar cerca de la zona de la construcción.

El material no apto para la consolidación de la base, puede ir a los botaderos existentes en la mina o buscar uno nuevo que este dentro de una distancia a la que los costos de acarreo no resulten antieconómicos.

Los caminos de acceso deben ser construidos de tal manera que permitirán el ingreso y salida de los volquetes en forma continua si es posible las 24 horas, dependiendo de la cantidad de material a retirar y del plazo disponible para esta actividad.

Para esta actividad se utiliza cargadores frontales y volquetes en las unidades previamente calculadas para tal fin.

## **1.5 MATERIAL DE RELLENO PARA CONSOLIDACIÓN**

Dependiendo de la topografía del terreno y de lo indicado en los planos del proyecto (estudio geotécnico) se corta o se rellena material. En la zona donde se ha cortado el material no apto se procederá a rellenar con material bueno. El material para relleno deberá cumplir con las normas establecidas en el expediente técnico, tales como: granulometría, compactación, densidad, etc. Estas pruebas se realizan constantemente en el campo y en el laboratorio de mecánica de suelos que debe existir necesariamente para la construcción del PAD. En el laboratorio se realizan pruebas de humedad, densidad, permeabilidad, cohesión, del material existente para ver si está apto o no para la fundación.

Previamente a la consolidación se buscan las canteras que proveerán el material de relleno, debiendo hacerse las pruebas respectivas para ver la calidad del material. Como se sabe el relleno es un material seleccionado generalmente del tipo granular. Los métodos empleados en su conformación, compactación y control, dependen principalmente de las propiedades físicas del material.

## **1.6 NIVELACION Y COMPACTACION DE TERRENO**

Los suelos seleccionados con los que se construyen los rellenos deberán ser compactados de la siguiente manera:

Cuando el 30% o menos del material es retenido en la malla  $\frac{3}{4}$ ".

- a) Si tiene más del 12% de finos deberá compactarse a una densidad mayor o igual del 90% de la máxima densidad seca del ensayo de compactación tipo proctor, modificado (ASTMD1557) en todo su espesor.



- b) Si tiene menos del 12% de finos, deberá compactarse a una densidad no menor del 95% del a máxima densidad seca del ensayo de compactación tipo proctor modificado (ASTMD1557) en todo su espesor.

Cuando más del 30% del material es retenido en la malla ¾”.

- a) Si el porcentaje de finos es mayor o igual que 15% deberá compactarse a una densidad relativa (ASTMD4254) no menor del 70%.
- b) No será recomendable la utilización de materiales con más de 15% de finos, salvo que se sustenten los métodos de compactación y control.

Deberán realizarse controles de compactación en todas las capas compactadas a razón necesariamente de un control por cada 250m<sup>2</sup> como máximo.

La compactación se realizará con rodillo vibratorio pudiendo ser de 08 - 10 TM.

## **1.7 INSTALACION DE GEOMEMBRANA (LINERS)**

Luego que se ha nivelado y compactado el terreno, se procederá a la instalación de la geomembrana.

La mejor combinación de liners es el sistema donde tenemos una capa de arcilla y un material geomembrana-geosintética colocada directamente sobre ella. Las ventajas de algunas de las geomembranas de alta densidad que se utilizan hoy en día como la HDPL y la LDPL son su alta resistencia al ataque químico, alta resistencia a la luz ultravioleta y resistencia al manipuleo rudo como también sus precios ligeramente bajos. Las desventajas del polietileno de alta densidad son la susceptibilidad a agrietarse por el esfuerzo y la poca flexibilidad, es un liner algo rígido y tiene un coeficiente de fricción más bajo que los materiales de muy baja densidad.

El otro tipo de material que se usa más frecuentemente, es el polietileno de baja densidad VFPE, sus propiedades elásticas son muy buenas. No es tan susceptible al

esfuerzo y usualmente es suficiente colocar un “liner” de 1 mm. de espesor siempre y cuando este protegido. Es también ligeramente menos resistente a las sustancias químicas y no es recomendable colocarlo en áreas expuestas a los rayos ultravioletas, asimismo tiene menor resistencia a los daños ocasionados por material grueso por lo que es necesario que para evitar que el liner sea dañado hay que tamizar el material que servirá como capa de protección.

La geomembrana se comercializa en rollos de 7 m. de ancho por 200 m. de largo aproximadamente y su costo actual, por ejemplo para una geomembrana tipo HDPL (High Density Poletileny) de alta densidad y espesor de 1.5 m. es US\$ 3.90 por m<sup>2</sup> más IGV.

La instalación se hace sobre la superficie de fundación ya nivelada, tendiéndose y estirándose los rollos de gemembrana y que se traslapan, sellándose mediante calor que se le aplica con una máquina eléctrica.

En la construcción de algunos PADS, se utiliza doble cobertura de geomembrana (primaria y secundaria) pero esto depende del tipo de terreno en que se construya lo que concluya el estudio geotécnico.

Es necesario determinar el tipo de liner más conveniente para cada lugar específico, ya que las propiedades de los materiales varían de un lugar a otro, por lo que es recomendable realizar pruebas de campo a escala real, ya que los resultados pueden ser muy diferentes a los obtenidos en el laboratorio.

## **1.8 INSTALACION DE TUBERÍAS DE RECOLECCION (DRENAJE)**

Las tuberías de drenaje se instalan encima de los liners y se utilizan para sacar la solución PREGNANT (rica) y trasladarla hacia la poza respectiva. También permite evitar la erosión y reducir la superficie de agua sobre el liner, la cual podría disminuir la estabilidad de la base.

Estas tuberías son de PVC y llevan unas perforaciones que permiten el ingreso de la solución líquida.

Se tienen tuberías principales y tuberías secundarias; las tuberías secundarias están distribuidas en toda el área del PAD y se instalarán con la gradiente respectiva hacia las tuberías principales, que generalmente están en el centro del PAD y lógicamente en las cotas más bajas de ésta.

## **1.9 CAPAS DE PROTECCIÓN (CUBIERTA)**

Luego de tener las tuberías de recolección y el liner colocado y hecho las pruebas respectivas, se procederá a la colocación de la capa de protección.

El material de cubierta que es colocada entre el revestimiento de geomembrana superior y el minera a ser procesado es determinante para el éxito de la construcción del revestimiento sin causar daños.

El tipo y espesor de la capa de cubierta son determinados por el tamaño y la angulosidad del material a ser utilizado, por el tipo de geomembrana y por el tipo de equipo que se utilizará en su construcción.

Los espesores típicos son de 24" (60 cm.) para un material de cubierta colocado con tractores sobre una geomembrana de HDPE de 60 milipulgadas (1.5 mm).

Por lo general se recomienda ensayos de campo a gran escala para probar o refutar una colocación de material de cubierta antes de utilizarlo sobre toda la instalación.

## **1.10 CARGUIO DE PAD POR PILAS**

Después de colocada la capa de protección, se comienza con el llenado de la pila con el mineral proveniente del tajo, utilizándose para esto los volquetes para el carguío y tractores para el esparcimiento del mineral.

El tamaño y granulometría del mineral que debe ir al PAD tiene que ser controlado constantemente para evitar el llenado con bolonería y material dañino para la lixiviación, como por ejemplo el carbón.

Los niveles de llenado son controlados topográficamente ya que es necesario para el control de la altura de llenado de la pila y también para la construcción de los caminos de acceso.

Actualmente existen PADS de pilas de lixiviación construidas hasta los 100 m. de altura, dependiendo esta de las condiciones hidrológicas del lugar y los aspectos geotécnicos de la fundación del PAD.

Con referencia al control de taludes en la pila de lixiviación esta se hace en forma permanente monitoreando el ángulo de reposo del talud, altura de los mismos y las bermas respectivas para detener deslizamientos.

## **1.11 CONSTRUCCION DE ZANJAS, CANALES Y BERMAS DE PROTECCIÓN**

Alrededor del PAD es necesario la construcción de estructuras de derivación aguas arriba que deriven la escorrentía en el perímetro de la instalación.

Esta derivación debe mantener un balance de agua controlable y razonable dentro de los límites de descarga cero. Estas estructuras están compuestas generalmente por sistema de zanjas, canales y bermas de protección y están diseñadas para derivar los

flujos que resultan de tormentas especificadas evitando también la erosión que conduciría ya sea al mantenimiento o a la falla.

La estabilidad erosional está muy en fusión de la velocidad del agua, la geomorfología y la variación entre los flujos promedio y fijo.

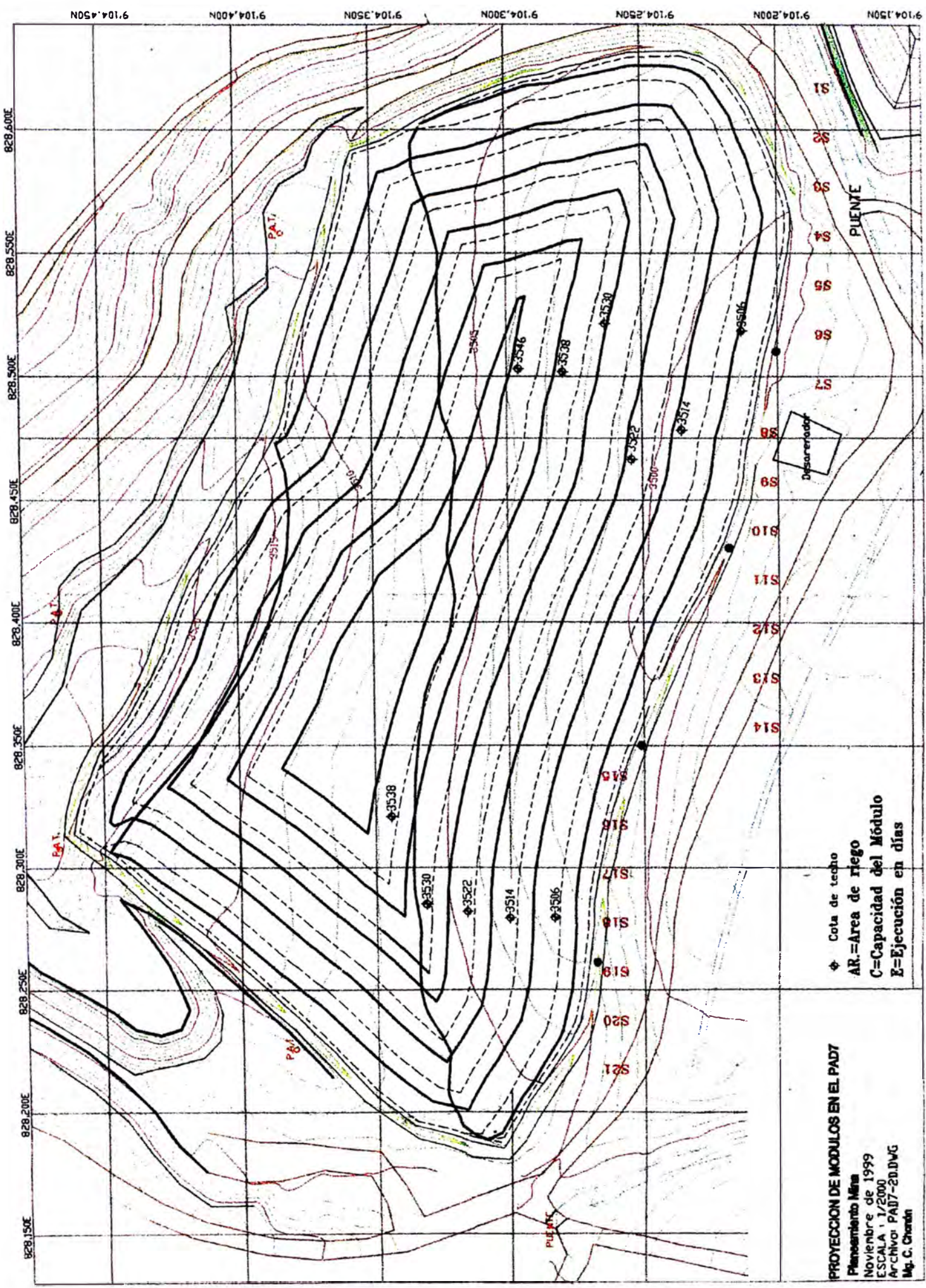
Las zanjas se construyen a continuación del pie del talud del PAD y las bermas un poco más retirado de las zanjas, ambas llevan revestimiento de geomembrana (HDPE) de alta densidad ya que van a estar expuestas a los rayos ultravioletas. Las dimensiones y detalles de su construcción deben estar especificados en los planos del proyecto.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El diseño de un PAD de lixiviación en pilas básicamente debe considerar los siguientes aspectos:
  - Ubicación cerca de la zona del cuerpo mineralizado.
  - Topografía de la zona (distancias y alturas de corte y relleno).
  - Potencial de impacto a la flora y fauna (medio ambiente).
  - Balance de agua (estudio hidrológico).
  - Diseño de sistema del liners (revestimiento).
  - Fundación del PAD (estudio geotécnico).
  - Caracterización del mineral (densidad, humedad, permeabilidad, etc.).
  - Tamaño del PAD y futura ampliación.
  - Costo de construcción del PAD y pozas de solución e infraestructura.
  
2. La ubicación de un PAD es aquella que equilibra apropiadamente los aspectos técnicos, económicos, sociales (políticos) y los impactos ambientales.
  
3. Existen dos tipos de PADS de lixiviación, las canchas planas y los rellenos de valle. Las canchas planas son el tipo más común utilizado por sus muchas ventajas en comparación con las canchas tipos rellenos de valle. Estas ventajas incluyen alturas relativamente bajas, uniformidad del espesor del material, un mejor control de la solución y tasas de recuperación relativamente altas. La principal desventaja es que se requiere un área nivelada naturalmente para construir en forma económica dichas instalaciones sin costos excesivos por movimientos de tierra.
  
4. El uso de la tecnología de lixiviación en la industria minera durante la década del ochenta y en la del noventa ha sido impulsada por la exploración y desarrollo de grandes depósitos de mineral de baja ley, siendo un método de recuperación económico para este tipo de yacimientos.

5. Es muy importante el criterio de selección del sitio para la ubicación del PAD, en lo referente al impacto ambiental ya que debe considerarse el potencial de impacto a la flora y fauna, impactos visuales, impacto a los recursos hídricos de superficie y sub-superficie, consecuencias ambientales de falla del sistema, entre otros.
6. Las instalaciones de lixiviación en pilas y botaderos están siempre destinadas a proteger el ambiente, mientras se procesa el mineral en forma confiable y económica. Todas estas instalaciones son diseñadas con “descarga cero”, lo que significa que el sistema entero que puede contener potencialmente los residuos de proceso (sólidos o líquidos) está adecuadamente separado del ambiente mediante estructuras diseñadas.
7. Con un buen diseño y una buena construcción se puede culminar el proyecto en forma económica y en el tiempo previsto para que entre en funcionamiento.





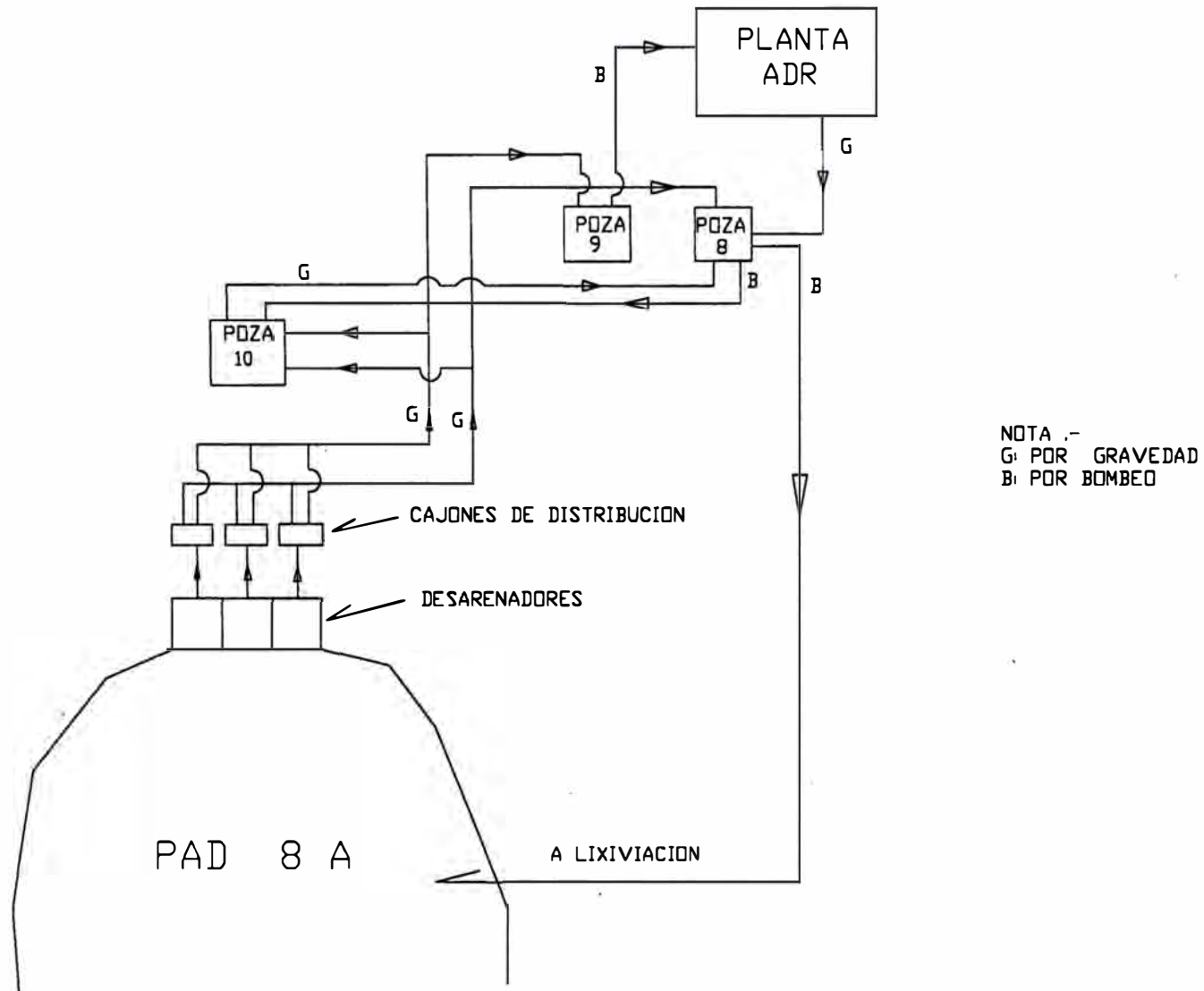
◆ Cota de techo  
 AR.=Area de riego  
 C=Capacidad del Módulo  
 E=Ejecución en días

**PROYECCION DE MODULOS EN EL PAD7**  
 Placeramiento Mina  
 Noviembre de 1999  
 ESCALA 1/2000  
 Archivo: PAD7-20.DWG  
 Ing. C. Chondán



# PROYECTO PAD 8

## DIAGRAMA DE FLUJO PARA OPERACION DEL PAD 8





INSTALACION DE GEOMEMBRANA.



GEOMEMBRANA





TUBERIAS DE RECOLECCION

CAPA DE PROTECCION  
(CUBIERTA)



CUBIERTA

GEOMEMBRANA





**MAS DE UNA DECADA** de intenso calor, luz solar, arena abrasiva, fuertes vientos, más contacto con petróleo y agua salada, y este forro XR-5® aún mantiene sus calidades y especificaciones originales. El bajo nivel de expansión/contracción de XR-5® frente a cambios extremos de temperatura significa que no ocurren fisuras por tensión.



POZA DE SOLUCION RICA (PREGNANT)



GUNDLIN<sup>®</sup> HD is a high quality formulation of High Density Polyethylene containing approximately 97.5% polymer and 2.5% of carbon black, anti-oxidants and heat stabilizers. The product was designed specifically for exposed conditions. It contains no additives or fillers which can leach out and cause embrittlement over time.

## GUNDLIN<sup>®</sup> HD SPECIFICATIONS

PROPERTY	TEST METHOD	GAUGE (NOMINAL)								
		20 mil (0.5 mm)	30 mil (0.75 mm)	40 mil (1.0 mm)	50 mil (1.25 mm)	60 mil (1.5 mm)	80 mil (2.0 mm)	100 mil (2.5 mm)	120 mil (3.0 mm)	140 mil (3.5 mm)
Density (g/cc) (Minimum)	ASTM D1505	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
Melt Flow Index (g/10 min.) (Max.)	ASTM D1238 Condition E (190°C, 2.16 kg.)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Minimum Tensile Properties (Each direction)	ASTM D638 Type IV Dumb-bell at 2 ipm.									
1. Tensile Strength at Break (Pounds/inch width)		80	120	160	200	240	320	400	480	560
2. Tensile Strength at Yield (Pounds/inch width)		50	70	95	115	140	190	240	290	340
3. Elongation at Break (Percent)		700	700	700	700	700	700	700	700	700
4. Elongation at Yield (Percent)		13	13	13	13	13	13	13	13	13
5. Modulus of Elasticity (Pounds per square inch × 10 <sup>5</sup> )	ASTM D882	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Tear Resistance Initiation (Min. lbs.)	ASTM D1004 Die C	15	22	30	37	45	60	75	90	105
Low Temperature/Brittleness (°F)	ASTM D746 Procedure B	-112	-112	-112	-112	-112	-112	-112	-112	-112
Dimensional Stability (Each direction, % change max.)	ASTM D1204 212°F 1 hr.	±2	±2	±2	±2	±2	±2	±2	±2	±2
Volatile Loss (Max. %)	ASTM D1203 Method A	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Resistance to Soil Burial (Maximum percent change in original value)	ASTM D3083 using ASTM D638 Type IV Dumb-bell at 2 ipm.									
Tensile Strength at Break and Yield	% Change	±5	±5	±5	±5	±5	±5	±5	±5	±5
Elongation at Break and Yield	% Change	±10	±10	±10	±10	±10	±10	±10	±10	±10
Ozone Resistance	ASTM D1149 7 days 100 ppm, 104°F Magnification	No cracks 7x	No cracks 7x	No cracks 7x	No cracks 7x	No cracks 7x	No cracks 7x	No cracks 7x	No cracks 7x	No cracks 7x
Environmental Stress Crack (Minimum hours)	ASTM D1693* (10% Igepal, 50°C)	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Puncture Resistance (Pounds)	FTMS 101B Method 2065	26	40	52	65	80	110	140	160	180
Water Absorption (Max. % wt. change)	ASTM D570	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Hydrostatic Resistance (Pounds/square inch)	ASTM D751 Method A Procedure I	160	240	315	402	490	650	810	970	1130
Coefficient of Linear Thermal Expansion (× 10 <sup>-4</sup> $\frac{cm}{cm \cdot ^\circ C}$ ) Nominal	ASTM D696	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Moisture Vapor Transmission (g/m <sup>2</sup> · day)	ASTM E96	0.06	0.05	0.04	0.035	0.03	0.02	0.01	0.007	0.005
Thermal Stability Oxidative Induction Time (OIT) (minutes, minimum)	ASTM D3895 130°C, 800 psi O <sub>2</sub>	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000

\*Note: Testing longer than 1500 hours is unnecessary because after 1500 hours polyethylene relaxes in the bent condition of the test.