

TECNICAS DE PREVENCION Y CONTROL DE LA GENERACION ACIDA EN MINERIA

Dr. Ing. Osvaldo Aduviri

Practice Leader de Unidad Geoambiente. SRK Consulting (Peru) S.A.

e-mail : oaduvire@srk.com.pe

RESUMEN:

La minería como actividad dedicada a la extracción de recursos que alberga un yacimiento, genera un gran volumen de materiales y residuos sólidos que deben almacenarse adecuadamente en depósitos de desmontes y relaves denominados botaderos y relaveras, por lo general, estos residuos mineros suelen contener sulfuros que en contacto con la atmósfera y agua inician unos complejos procesos de transformaciones físicas, químicas y biológicas, que dan origen a la generación de drenajes ácidos de mina. En la práctica la velocidad de la generación ácida va a depender de una serie de factores como: las características fisicoquímicas del macizo rocoso excavado, de las condiciones de almacenamiento de estos materiales y residuos, y de la posibilidad de que estos materiales entran en contacto con agua y aire.

La introducción de innovaciones técnicas en el desarrollo y planeamiento de proyectos mineros desde su inicio hasta el cierre, ayuda a reducir las alteraciones e impactos que genera la actividad minera, estas actividades principalmente están orientadas al manejo de los estériles de mina y los residuos de los procesos de beneficio de minerales, además permite hacer un uso racional de los recursos, así como el reciclado y el aprovechamiento de estos residuos mineros. Para ello se realiza estudios de caracterización geoquímica de la roca excavada y ver su comportamiento en el tiempo ácido productores o ácido consumidores (generadores de alcalinidad), permitiendo de esta forma predecir la calidad de los drenajes cuando se produzca la alteración de todo el material excavado. En la caracterización geoquímica de estos materiales y residuos, generalmente se recurre al empleo de ensayos estáticos en el que se determina el potencial ácido/base de los materiales o a ensayos cinéticos (principalmente métodos de lixiviación) insitu o en laboratorio en los que se reproducen las condiciones ambientales de campo (físicas, químicas y biológicas), que junto con la revisión de otros parámetros como pH en pasta, contenido de azufre como sulfuro, test de efervescencia y mineralogía, permiten evaluar la posibilidad de generación ácida a largo plazo en caso que los residuos de mina y las rocas excavadas experimenten procesos de alteración o lixiviación.

En este trabajo se describen las mejores técnicas disponibles introducidas en la prevención, caracterización y control de la generación ácida, así como en el manejo de materiales (rocas excavadas) y residuos mineros (desmontes y relaves) a fin de buscarle un uso a estos materiales y residuos o mejorar el sistema de almacenamiento a largo plazo.

PALABRAS CLAVE:

Técnicas de prevención, formación de drenaje ácido

1. INTRODUCCION.

En la actualidad se están imponiendo procesos mineros innovadores que permiten considerar a los residuos mineros sólidos y líquidos como recursos potenciales a través de programas de valorización y aprovechamiento de subproductos. Este planteamiento fomenta el uso racional de los recursos naturales mediante técnicas más eficientes que incrementan el número de aplicaciones de los recursos y reducen el volumen final de residuos, al mismo tiempo estas actuaciones constituyen una oportunidad de negocio de subproductos y materiales secundarios, además de constituir una vía a la reducción de los costos de tratamiento y almacenamiento final.

Para un adecuado manejo de materiales (rocas excavadas) y residuos mineros (desmontes y relaves) se están introduciendo programas de evaluación de generación ácida a fin de elegir el uso más adecuado de estos materiales o el sistema de almacenamiento eficiente a largo plazo de estos materiales.

2. OBJETIVOS.

Describir técnicas de caracterización geoquímica para materiales y residuos mineros que permitan predecir la generación ácida a partir de ensayos de laboratorio denominados ensayos ácido/base que simulan las reacciones que experimentarán los materiales excavados cuando entran en contacto con la atmósfera y agua de lluvia e inicien un complejo mecanismo de oxidación que pueden terminar generando drenajes ácidos.

3. METODOLOGIA.

Para la caracterización geoquímica de sólidos se han tomado muestras de rocas y residuos mineros y se sometieron a ensayos o pruebas estáticas usualmente recomendadas en este tipo de estudios. Estas pruebas contemplan por un lado la determinación del pH en pasta, cuyo objetivo es determinar la eventual presencia de

acidez acumulada por oxidación o meteorización previa de los sulfuros contenidos en el material y, por otro lado, un balance ácido/base (ABA). En el ensayo o test ABA, se estima la cantidad de ácido que podría generar una muestra por oxidación total de la pirita o sulfuro contenido en la misma y la cantidad de material que genera alcalinidad que puede neutralizar la acidez generada.

Por lo general, estos ensayos ácido/base constituyen procedimientos rápidos y sencillos para evaluar la posibilidad de formación o no de acidez, sin embargo, para lograr una mayor exactitud en la evaluación ésta información debe correlacionarse con otras variables como: pH, contenido de azufre, capacidad de aportar alcalinidad (efervescencia), mineralogía, granulometría, así como estudios analíticos que sirven para ajustar o corregir la valoración.

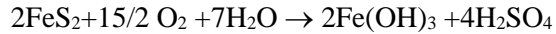
4. CARACTERIZACION DE RESIDUOS MINEROS.

4.1. Generación y Control de la Acidez

La consecuencia directa de la actividad minera al llevar a cabo la explotación de un yacimiento es la geodisponibilidad de materiales hacia el medioambiente, estos materiales excavados en contacto con la atmósfera y agua inician unos complejos procesos de transformaciones físicas, químicas y biológicas, que dan origen a unos drenajes de mina que por lo general son ácidos y contienen elevadas concentraciones metálicas. Los efluentes así generados son una de las principales fuentes de biodisponibilidad de elementos contaminantes que degradan la calidad de los ecosistemas acuáticos. La actividad minera ya sea en su etapa de exploración o explotación acelera la alteración física y química de los materiales geológicos, al exponer mayores áreas superficiales de los materiales excavados a la meteorización que podrían generar descargas con carga contaminante.

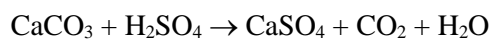
La mayoría de los yacimientos contienen mineralizaciones de sulfuros metálicos, y en muchos casos las rocas en donde se emplazan los yacimientos o el cuerpo mineralizado también puede contener minerales tipo

sulfuros no comercializables, aunque también existen mineralizaciones emplazadas en roca caliza. La pirita (FeS_2) es uno de los sulfuros más comunes, cuando se oxida, puede liberar acidez, sulfato y otros elementos. La oxidación de la pirita, por acción del oxígeno, incluye la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} y la precipitación de hierro como hidróxido, que en el caso de la pirita tiene la siguiente reacción general:



Por lo general los sulfuros representan la principal fuente de generación de acidez en materiales geológicos o residuos mineros como rocas de desmonte o relaves. En algunos casos el ácido generado por la oxidación del sulfuro suele ser consumido por la disolución de otros minerales como la calcita o rocas como la caliza presentes en las zonas de excavación que tienen la capacidad inherente para neutralizar la acidez. La capacidad de un mineral para neutralizar o generar acidez está en función a su composición y a su velocidad de meteorización, que en muchos casos estas reacciones son catalizadas por bacterias que potencian enormemente la generación ácida.

Los carbonatos, como la calcita (CaCO_3), son minerales básicos altamente reactivos que se disuelven rápidamente para neutralizar la acidez. En la reacción anterior se asume la equivalencia de que se producen dos moles de ácido por cada mol de azufre, estos moles de acidez generados (2H^+) pueden ser neutralizadas por compuestos alcalinos según la siguiente reacción:



De donde se deduce que un mol de azufre puede ser neutralizado por un mol de CaCO_3 . Por tanto, para neutralizar la acidez generada por un mol de azufre se requiere como mínimo dos moles de carbonato. Con estas consideraciones, se deduce que para asegurar la neutralización de un material potencialmente generador de acidez se requiere aproximadamente tres veces la cantidad de material que consume acidez (alcalino).

En menor medida los minerales silicatados como las micas, biotitas y feldespatos suelen neutralizar la acidez, aunque estas reacciones generalmente son más lentas que los carbonatos, también contribuyen a la neutralización de la acidez.

4.2. Ensayos para estimar el potencial de Acidez

Por lo general se recurre a los Test ABA (Acid-Base Accounting) que da información sobre generación o no de acidez sobre muestras representativas, en función de:

- pH en pasta y Efervescencia
- Especies de azufre, incluyendo azufre total, sulfuro y sulfato
- Potencial de neutralización (NP), basado en mediciones de NP, carbono y elementos totales
- Potencial de Acidez (AP), basado en las especies de azufre

Uno de los indicadores utilizados en la valoración de acidez es el Potencial Neto de Neutralización (NNP), que es la capacidad de un mineral o material para generar o consumir acidez y se obtiene por diferencia entre el potencial de neutralización (NP) y el potencial de acidez (MPA o AP) o acidez total en la muestra (ver Figura 1).

Cuando el potencial neto de neutralización ($\text{NNP} = \text{NP} - \text{AP}$), entregue un valor negativo por debajo de -20 indica que existe un potencial de generación ácida. Por el contrario, un valor positivo del NNP mayor a +20 indica que la capacidad de neutralización supera la capacidad de generación de acidez y por lo tanto el material no es potencialmente generador de acidez (Fig. 2). Pero cuando los valores de NNP están entre -20 y +20 la predicción de la producción ácida es incierta y/o algo dificultoso, por lo que es necesario ver la composición mineralógica de las muestras, antes de pasar a ensayos cinéticos u otros estudios que simulen el comportamiento de la muestra a largo plazo. Todos los valores se reportan en cantidad equivalente de carbonato de calcio (CaCO_3). Otra relación que permite

determinar el potencial de generación ácida en fase sólida, lo constituye las siguientes relaciones:

Si $NP/MPA > 3$ no producirá drenaje ácido

Si $1 < NP/MPA < 3$ esta rango de incertidumbre

Si $NP/MPA < 1$ posible generación de drenaje ácido (relación 1:1 o menor)

De igual forma, para confirmar o descartar la generación o no de acidez las muestras también se someten a análisis mineralógicos por difracción de Rayos X.

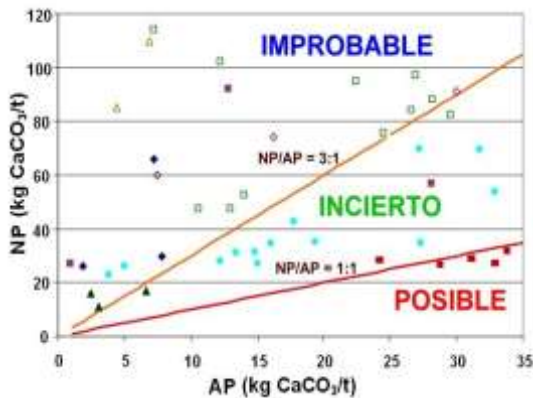


Figura 1. Relación de los potenciales de generar y consumir acidez para determinar la generación ácida de residuos mineros.

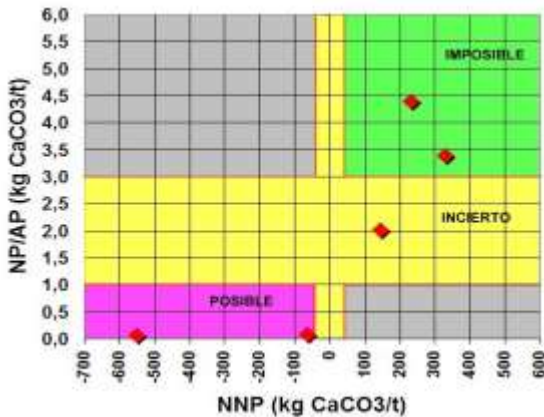


Figura 2. Relación NP/AP y NNP para delimitar las zonas de generación ácida

4.3. Análisis Mineralógico

Para ajustar la predicción de acidez en una muestra y sobre todo cuando los resultados ABA dan valoración incierta, la mineralogía aporta información sobre las especies mineralógicas presentes y sus contenidos con

un determinado límite de detección, mediante la realización de análisis mineralógicos semicuantitativo por Difracción de Rayos X (ver Tabla 1 y Figura 4).

Tabla 1. Mineralogía contenida en una muestra de relave.

Muestra	Descripción	
1B	Depósito de relaves	
Minerales /1B	Formula	% en Peso
Cuarzo	SiO ₂	55.1
Siderita	FeCO ₃	24
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	0.7
Calcita magnesiana	(Ca, Mg)CO ₃	0.1
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₇ (OH) ₄	4.5
Muscovita	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	0.7
Clorita	(Mg, Fe) ₃ (Al, Si) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	1.2
Ortoclasa	K(AlSi ₃ O ₈)	0.6
Albita	Na(AlSi ₃ O ₈)	0.8
Anortita	Ca(Al ₂ Si ₂ O ₈)	0.9
Pirita	FeS ₂	1.74
Calcopirita	Cu ₂ FeS ₂	0.14
Esfalerita	(Zn, Fe)S	3.91
Galena	PbS	0.62
Anhidrita	CaSO ₄	0.4
Bassanita	CaSO ₄ · 0.5H ₂ O	0.6
Goetita	FeO(OH)	1.5
Hematita	Fe ₂ O ₃	0.9
Jarosita	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	0.4
Alunita	(K, Na)Al ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂	0.1
Montmorillonita	(Na, Ca) _x (Al, Mg) ₃ Si ₂ O ₁₀ (OH) ₂ · nH ₂ O	0.7

Los estudios mineralógicos identifican los minerales de una muestra a través de microscopios ópticos, láser y difracción de rayos-X, esta información es muy importante porque es complementaria a los ensayos ABA. Conociendo en detalle la mineralogía, se puede predecir la química de los drenajes, asumiendo que estos pueden verse influenciados por las impurezas que contienen y acompañan a los minerales que afectan la composición, las tasas de reacción y la química del agua.

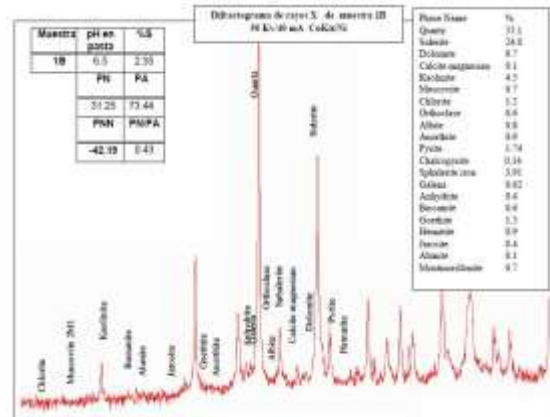


Figura 3. Relación entre NP y AP con la mineralogía presente para indicar el potencial de generación ácida.

La composición mineralogía obtenida a través de los análisis mineralógicos nos da información de los minerales presentes con sus concentraciones en porcentaje y sus difractogramas, que es muy útil para muestras con contenidos significativos de cuarzo y sílice con comportamiento incierto en los ensayos ABA. Como en el caso de la Figura 3 los datos ABA indican generación ácida, pero, observando su mineralogía el contenido de minerales sulfurosos (pirita) que generan acidez solo representan el 1,74% y más del 55% de la muestra corresponde a cuarzo.

La correlación entre mineralogía y ensayos ABA ayuda a una mejor caracterización geoquímica de los materiales y residuos mineros, sobre todo cuando los ensayos ABA dan resultados inciertos. Esto permite diseñar con mayor precisión los depósitos de desmonte y relaves, y adecuar la planificación del movimiento de materiales excavados al menor costo y mayor control ambiental.

4.4. Evaluación de generación ácida en Fase Sólida.

Teniendo en cuenta que con el tiempo algunos minerales se comportan como ácido productores y otros como generadores de alcalinidad que neutralizan la acidez, conociendo esta característica se puede predecir la calidad de los drenajes de mina cuando se produzca la alteración de los materiales excavados. Para ello se recurre al empleo de uno o varios *ensayos estáticos* en el que se determina el potencial ácido/base de los materiales. También se suele emplear *ensayos cinéticos* (principalmente métodos de lixiviación) insitu o en laboratorio en los que se reproducen las condiciones ambientales de campo (físicas, químicas y biológicas). Y en otros casos se recurre al empleo de técnicas que incluyen procedimientos geofísicos y/o geoquímicos.

Los ensayos estáticos, se basan en la evaluación del balance entre el potencial de generación ácida AP (oxidación de minerales sulfurosos) y la capacidad de neutralización ácida NP (disolución de carbonatos y otros minerales que aportan alcalinidad). Utilizando estos potenciales, los residuos mineros se

puede caracterizar mediante indicadores como el *potencial neto de neutralización (NNP)*, o la *relación ácido/base (NP/AP)* y *Contenido de Azufre como sulfuro* (Fig. 4). También se puede clasificar según los resultados obtenidos en los ensayos de *generación ácida neta (NAG)* en función a la medida de la conductividad eléctrica (EC) y pH en pasta.

La Generación Neta de Acidez (NAG) sirve para determinar la probabilidad de generación de drenajes ácidos, mediante la aceleración de la oxidación y de las reacciones de neutralización. A pesar del nivel de interpretación requerido los ensayos NAG son métodos preferidos para la caracterización de estériles y residuos de mina.

En la práctica, con los ensayos NAG se puede clasificar los materiales excavados y los residuos de mina que se almacenan tanto en los depósitos de desmonte (Escombreras) como en los depósitos de relaves que proceden de los procesos de beneficio o los residuos de las pilas de lixiviación, y hacer una agrupación como la presentada en la Tabla 2.

Por otro lado, haciendo una correlación entre el ratio NP/AP con el contenido del azufre como sulfuro en porcentaje, también se puede determinar los límites del potencial de generación ácida de las muestras y materiales (Fig. 4). En general, cuando el ratio NP/MPA es 3:1 o mayor y el contenido de azufre como sulfuro es menor a 0,3 % no hay generación de acidez o el riesgo de que se generen drenajes ácidos es muy bajo.

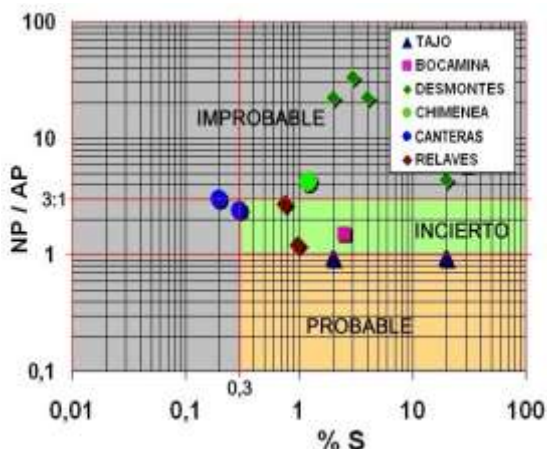
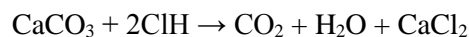


Figura 4. Relación NP/MPA y S para indicar el potencial de generación ácida.

4.5. Efervescencia en la predicción ácida.

Los carbonatos (calcita, dolomita) tienen una importante característica identificativa, que es dar efervescencia con desprendimiento de CO₂ en contacto con una solución de ácido clorhídrico, incluso en frío:



Teniendo en cuenta esta característica de los carbonatos, en la Tabla 3 se muestra una escala de efervescencia que ayuda a estimar la capacidad de contrarrestar la generación ácida en materiales y residuos mineros.

Tabla 3. Efervescencia como indicador de capacidad de neutralización.

RATIO EFERVESCENCIA	DESCRIPCION (Al añadir gotas de ácido a la muestra)
1	No efervescente, ausencia de burbujas
2	Poco efervescente, algunas burbujas visibles
3	Efervescencia moderada, burbujeo continuo
4	Efervescencia alta, burbujeo continuo con ruido audible

Valores de efervescencia 1 o 2 en las muestras indican que poseen un déficit alto de alcalinidad, siendo este déficit mayor cuando el pH en pasta de los sólidos es menor a 4,5.

Tabla 2. Caracterización de Residuos Mineros en función al pH en pasta y la Conductividad (Environment Australia, 1997).

TIPO DE MATERIAL	CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS	RECOMENDACIONES
I A	No forma acidez Nada, baja o moderada salinidad NAG: pH > 4 y EC (1:5) < 0,8 dS/m NAG: pH > 4 y EC (1:2) < 1,5 dS/m	Apropiado para cualquier tipo de construcción y relleno. No requiere especificación geoquímica. Apropiado para trabajos de restauración.
I B	No forma acidez Alta salinidad NAG: pH > 4 y EC (1:5) 0,8-1,3 dS/m NAG: pH > 4 y EC (1:2) 1,5-2,5 dS/m	Apropiado para rellenos en general. No deseable para recuperación de terrenos salinos. Evitar dejar áreas con 30 cm de superficie libre.
I C	No forma acidez Extrema salinidad NAG: pH > 4 y EC (1:5) > 1,3 dS/m NAG: pH > 4 y EC (1:2) > 2,5 dS/m	Puede utilizarse como relleno en general, siempre que este aislado del núcleo de la presa. No dejar áreas restauradas con 50 cm de superficie.
II	Potencial formador de acidez Riesgo bajo 3 < NAG: pH < 4	No apropiado para usos en construcción y rellenos en general, a menos que el núcleo de la presa este compactado y aislado de lixiviados. No dejar áreas con 1 m de superficie libre o de talud final de la escombrera. Estos materiales pueden convertirse en tipo I si se mezclan con caliza u otros materiales que neutralizan la acidez.
III	Potencial formador de acidez Riesgo alto	Sus lixiviados deben ser encapsulados y aislados. Debe depositarse en capas compactadas. Ubicar este material en el centro de las escombreras.

	NAG: pH < 3	<p>No dejar áreas con 1 m de superficie libre o 5 m en el talud final de la escombrera.</p> <p>En restauración poner una capa compactada de material tipo I C sobre el de tipo III antes de colocar los suelos de cobertera (arcillas, tierra vegetal y otros).</p> <p>Estos materiales pueden convertirse en tipo I si se mezclan con caliza u otros materiales que neutralizan la acidez.</p>
--	-------------	---

NOTA: EC (1:5) = Conductividad eléctrica en mezcla de 1 parte de sólido y 5 partes de agua.

5. APLICACIÓN DE LA PREDICCIÓN ACIDA EN EL DISEÑO DE LOS DEPOSITOS DE RESIDUOS MINEROS.

La caracterización geoquímica ayuda a reducir el impacto ambiental que produciría la generación de drenajes ácidos procedentes de los depósitos de residuos. Así como a mejorar los diseños de éstas estructuras con el fin de evitar la entrada de agua y oxígeno.

La predicción de la generación ácida de los materiales y rocas a excavar se puede realizar mediante el muestreo en los mismos sondeos de exploración geológica del yacimiento, y clasificar los materiales y litologías presentes según su capacidad de generar o no acidez. Esto permite cuantificar los volúmenes de estéril y mineral a mover y agrupar en función a su capacidad ácido/base a los estériles de mina (Fig. 5). Además, ayuda a planificar la apertura y cierre de una explotación minera y a diseñar depósitos de estériles y relaves de modo que no formen drenajes ácidos una vez que las rocas queden expuestas al contacto del aire y agua (Fig.6).

En el caso de existir materiales o estériles formadores de acidez se puede recurrir a diseños de depósitos de desmonte (escombrera) que incorporen medidas que supriman uno o varios elementos y procesos formadores de acidez, adaptando las secuencias constructivas y los ritmos de vertidos, de forma que los materiales con alto potencial de acidez queden aislados o encapsulados y sin posibilidad de sufrir alteración (Fig. 6).

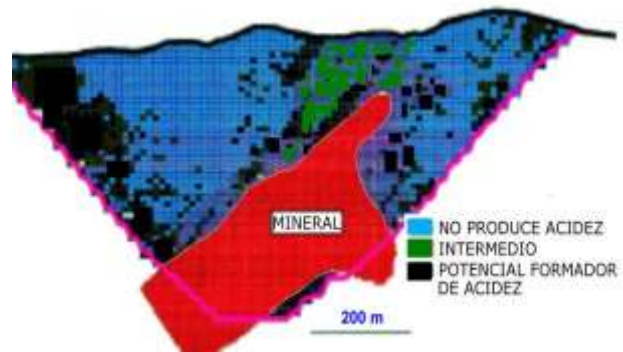


Figura 5. Perfil ácido/base de un yacimiento antes de su explotación.

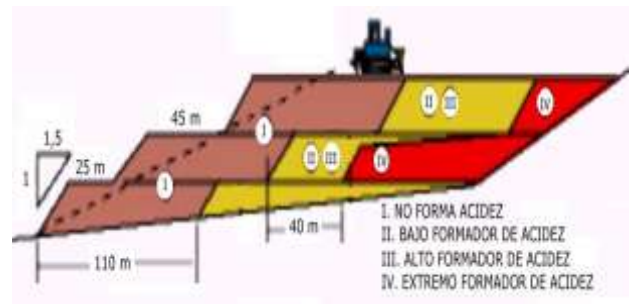


Figura 6. Diseño de una escombrera de mina teniendo en cuenta la relación ácido/base de los materiales a depositar.

6. CONCLUSIONES.

El cometido principal de la determinación del potencial de acidez de los residuos mineros, es evaluar la capacidad de generación ácida a largo plazo y tomar medidas preventivas y de control para reducir este riesgo. Estas medidas de control van desde el aislamiento o supresión de uno más de los componentes que posibilitan la generación ácida como agua, aire, sulfuros y actividad bacteriana, hasta el encapsulado total de los materiales excavados con que contienen sulfuros. Por tanto, la caracterización geoquímica de los materiales y residuos

mineros permite hacer un manejo adecuados de estos y a diseñar en condiciones ventajosas los depósitos para almacenarlos.

El control de la generación ácida en los materiales y residuos puede realizarse a través de la aplicación de una o varias de las siguientes medidas:

- Restringiendo el ingreso del agua en los relaves y evitando la exposición a la meteorización
- Minimizando la penetración de oxígeno mediante el empleo de cubiertas con materiales impermeabilizantes
- Aislando los minerales sulfurosos, mediante algún tratamiento previo al vertido
- Controlando el pH del medio, mediante la adición de materiales alcalinos
- Empleando bactericidas para inhibir la acción bacteriana sobre los minerales sulfurosos.

REFERENCIAS.

Aduvire, O., Escribano, M., García-Bermudez, P., López-Jimeno, C., Mataix, C. y Vaquero, I. 2006. Manual de construcción y restauración de escombreras. Ed. U. D. *Proyectos (ETSIM-UPM)*. 633pp. ISBN: 84-96140-20-2.

Alpers, C. y Blowes, D. (1992). Environmental geochemistry of sulfide oxidation. *National Meeting of the American Chemical Society*. Washington, DC. 325-342.

MEND. Mine Environment Neutral Drainage. (2005). List of Potential Information Requirements in Metal Leaching/Acid Rock Drainage Assessment and Mitigation Work. MEND Report 5.10E

Price, W.A., (1997). Draft Guidelines and Recommended Methods for the Prediction of Metal Leaching and Acid Rock Drainage at Minesites in British Columbia. Reclamation Section, Energy and Minerals Division, British Columbia Ministry of Employment and Investment. Smithers, B.C., Canada. 160p.

Sobek, A.A., W.A. Schuller, J.R. Freeman and R.M. Smith, (1978). Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils. Report EPA-600/2-78-054, US National Technical Information Report PB-280 495.

Giráldez, J., Laguna, A. y Jiménez, F. 2005. Posibilidades de las barreras capilares para reducir el riesgo de contaminación en suelos. *Simposio sobre Zona No Saturada del Suelo*. Vol. 8, 3-8.

Ross, B. 1990. The diversion capacity of capillary barriers, *Water Resources Research*, 26, 625-2629.

Wates, J.A., Rykaart, E.M. 1999. The Performance of Natural Soil Covers in Rehabilitating Opencast Mines and Waste Dumps in South Africa. *Water Research Commission Report 575/1/99*, ISBN No. 1868456139.

Zehner, W.B., Cornelius, J.M. y Besson, D.L. 1997. Acid/base account and minesoils: a review. *14th Annual National Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation*. Austin, Texas, May, 404-409.

Ziemkiewicz, P.F. y Brant, D.L. 1997. The Casselman river restoration project. *19th Annual Conference of the National Association of Abandoned Mine Lands Programs*. Davis, West Virginia, August, 9 pp