

**DESCRIPCIÓN DEL MANEJO INTEGRAL DE DRENAJES ACIDOS DE MINA A
NIVEL INTERNACIONAL**

LAURA TERESA CHAPARRO LEAL

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESPECIALIZACIÓN EN PRESERVACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LOS
RECURSOS NATURALES
BUCARAMANGA
2014**

**DESCRIPCIÓN DEL MANEJO INTEGRAL DE DRENAJES ACIDOS DE MINA A
NIVEL INTERNACIONAL**

LAURA TERESA CHAPARRO LEAL

MONOGRAFÍA

DIRECTOR

SANDRA NATALIA CORREA TORRES

PhD. QUÍMICA

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESPECIALIZACIÓN EN PRESERVACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LOS
RECURSOS NATURALES
BUCARAMANGA**

2014

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1. JUSTIFICACIÓN	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. MARCO TEÓRICO.....	17
3.1 GENERACIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS EN LA INDUSTRIA MINERA	17
3.1.1 Formación	20
3.1.2 Procesos Naturales de Neutralización	23
3.1.2 Factores Biológicos	24
3.2 IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR LOS DRENAJES ÁCIDOS DE MINA 27	
3.3 POTENCIALES RECURSOS GENERADORES DE DRENAJES ÁCIDOS	28
3.3.1 Minas a Cielo Abierto	29
3.3.2 Minas Subterráneas	30
3.3.3 Botaderos de Estériles o Sitios de Acopio.....	31
3.3.4 Relaves de Mina o Residuos Provenientes del Proceso de Beneficio	32
4. MANEJO DE LOS DRENAJES DE MINA	34
4.1 PREDICCIÓN.....	34
4.2 PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS.....	39
4.2.1 Métodos Especiales de Manejo.....	40
4.2.2 Cubiertas secas.....	42
4.2.3 Cubiertas Húmedas.....	45
4.3 TRATAMIENTO DE DRENAJES DE MINA.....	48
4.3.1 Métodos Activos de Tratamiento	48
4.3.1.1 Aireación	49
4.3.1.2 Neutralización	49
4.3.2 Tratamiento y Disposición de Subproductos de Tratamiento.	56

4.3.3	Métodos de Tratamiento Pasivos	58
4.3.3.1.1	Proceso Físico	60
4.3.3.1.2	Proceso Químico.....	60
4.3.3.1.3	Proceso de Remoción Biológica	61
5.	MONITOREO	68
6.	APROXIMACIÓN AL MANEJO DE DRENAJES DE MINA EN COLOMBIA	72
6.1	ASPECTOS A MEJORAR EN EL MANEJO DE DRENAJES DE MINA EN COLOMBIA.....	74
	BIBLIOGRAFÍA.....	81

LISTADO DE IMÁGENES

Imagen 1: Drenaje ácido Natural Río Tinto España	19
Imagen 2: Clasificación de los posibles drenajes de roca en términos de la concentración de metales disueltos y el pH.....	19
Imagen 3: Clasificación de los posibles drenajes de mina o de roca en términos de la concentración de iones sulfato y el pH.....	20
Imagen 4: Etapas de acidificación de un drenaje de mina o de roca	24
Imagen 5: Bacterias presentes en drenajes ácidos de mina. A) Acidithiobacillus ferrooxidans, B) Leptospirillum ferrooxidans.....	25
Imagen 6: Principales factores que se deben tener en cuenta en la oxidación biológica de drenajes ácidos de mina	26
Imagen 7: Cuerpo de agua impactado por un DAM.....	28
Imagen 8: Recursos de generación de DAM	29
Imagen 9: Mina a cielo abierto	30
Imagen 10: Sulfuros en proceso de oxidación en mina subterránea	31
Imagen 11: Entrada de aire y agua a los botaderos de estéril o sitios de acopio temporal.....	32
Imagen 12: Columna de lixiviación	36
Imagen 13: Test a escala de campo para identificación de formación de DAM.....	36
Imagen 14: Tasa de Lixiviación de componentes de un estéril de mina	38
Imagen 15: Relaves con Obras para el manejo y aislamiento de aguas lluvia	41
Imagen 16: Factores que afectan las cubiertas con suelo en el corto y largo plazo	44
Imagen 17: Diferentes configuraciones para la implementación de cubiertas con suelo	45
Imagen 18: Cubiertas con agua para residuos mineros.....	46
Imagen 19: Aireación del DAM por gravedad	50

Imagen 20: Neutralización y precipitación de un drenaje ácido de mina	52
Imagen 21: Solubilidad de hidróxidos metálicos.	53
Imagen 22: Remoción de Sulfatos por vía Biológica.....	55
Imagen 23: Remoción de Sulfatos por vía Biológica.....	56
Imagen 24: Humedal para el Tratamiento de Drenajes de Mina.....	62
Imagen 25: Esquema de Barreras Reactivas Permeables	64
Imagen 26: Túnel de Minería Artesanal Abandonado	74

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de resultados obtenidos entre test cinéticos de laboratorio y de campo.	37
Tabla 2: Métodos especiales de manejo para prevención de formación de DAM..	40
Tabla 3:Comparación de caracterizaciones fisicoquímicas utilizando diferentes tipos de cubierta.....	47
Tabla 4:Características de los agentes neutralizantes más comúnmente utilizados para el tratamiento de DAM	50
Tabla 5:Comparación entre diferentes agentes neutralizantes y precipitantes utilizados en el Tratamiento de Drenajes de Mina.	51
Tabla 6: Comparación entre las técnicas de tratamiento utilizadas para remoción de sulfatos	53
Tabla 7:Alternativas de Disposición de Lodos Provenientes del Tratamiento de un DAM.....	57
Tabla 8: Clases de sistemas de tratamiento pasivos según las características del drenaje de mina	59
Tabla 9:Descripción de Sistemas de Tratamiento Pasivos Para Drenajes de Mina	63
Tabla 10:Comparación entre diferentes métodos de tratamiento de DAM	65
Tabla 11:Levantamiento de Información Relevante en un Plan de Monitoreo	69

GLOSARIO

Drenaje ácido de mina (DAM): flujo de agua que proviene de los trabajos subterráneos o superficiales de extracción de minerales, que contiene elevadas concentraciones de acidez, metales pesados y bajos valores de pH.

Drenaje ácido de roca (DAR): es un término que se utiliza alternativamente al DAM para referirse a los flujos de agua ácidos en un sentido más amplio, pues no se refiere únicamente a las minas, sino que también a los lixiviados provenientes de relaves, estériles de mina y sitios de acopio temporal.

Relaves: Material que es descartado después del proceso de trituración y molienda de la mena, y del beneficio de los minerales de interés económico.

Estéril de Mina: es el material con un contenido de minerales muy bajo, que no se procesa pues no es económicamente rentable.

Sitios de acopio temporal: lugar en donde se almacena temporalmente el material que ha de ser procesado posteriormente para la extracción de los minerales de interés.

Mena: Material que se ha formado naturalmente y que contiene minerales valiosos de interés económico.

Beneficio: es el proceso de concentración, y extracción de los minerales de interés de la mena.

Plan de Cierre: es un conjunto de medidas orientadas a asegurar el cese y la clausura de los trabajos mineros de manera satisfactoria minimizando los impactos sobre el medio ambiente y la salud humana.

Plan de Cierre Concurrente: el conjunto de medidas que permiten la clausura de los trabajos mineros, a medida que se van desarrollando las diferentes fases de un proyecto minero y no al final del mismo, asegurando recursos económicos durante todas las etapas para minimizar impactos sobre el medio ambiente y la salud humana.

Bioindicadores: Conjunto de organismos indicadores de la calidad del agua, aire o suelo y de su estado de degradación y contaminación.

Recuperación de ecosistemas: práctica relacionada con acciones de descontaminación, reforestación para protección y regulación hídrica, recuperación del paisaje, entre otras, para favorecer la devolución de un uso adecuado al sitio degradado.

Ecosistema: Sistema abierto, formado por un conjunto de comunidades vivas y elementos abióticos dentro del cual ocurren intercambios de materia y energía, y en el cual sus elementos interactúan entre sí.

Lodos DAM: subproductos provenientes del proceso de neutralización de drenajes de mina, compuestos generalmente por hidróxidos metálicos, sulfatos, carbonatos y exceso de base de acuerdo al sistema de tratamiento utilizado.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DESCRIPCIÓN DEL MANEJO INTEGRAL DE DRENAJES ACIDOS DE MINA A NIVEL INTERNACIONAL.

AUTOR(ES): Laura Teresa Chaparro Leal

FACULTAD: Esp. en Preservación y Conservación de los Recursos Naturales

DIRECTOR(A): SANDRA NATALIA CORREA TORRES

RESUMEN

El presente trabajo de monografía describe el manejo y control que se ha hecho de los drenajes ácidos de mina en países con grandes desarrollos mineros como Canadá y Estados Unidos, en donde por causa de este pasivo ambiental se han contaminado miles de kilómetros de fuentes hídricas superficiales con metales pesados, acidez y sedimentos que han desplazado las poblaciones de peces y en algunos casos han eliminado toda posibilidad de vida en los ecosistemas acuáticos. Los avances científicos en el estudio de los pasivos ambientales mineros, han podido establecer una estructura ordenada para proceder en el abordaje de los drenajes de mina, la cual consta de 3 grandes etapas que son: la predicción, la prevención y finalmente el tratamiento de los efluentes mineros, todas acompañadas de herramientas de monitoreo. La elaboración de estudios en las diferentes etapas de exploración y explotación de una mina ha permitido reducir considerablemente los efectos de la contaminación de fuentes hídricas superficiales y subterráneas, debido a que el enfoque no se encuentra dirigido hacia el tratamiento y remediación, sino hacia la eliminación de las posibilidades de su aparición. En Colombia, el manejo de los pasivos ambientales mineros, especialmente de los drenajes ácidos aún no ha adquirido la importancia que merece, debido a que hace falta información, cuantificación de los impactos ambientales generados por esta problemática y legislación que permita controlar sus devastadores efectos.

PALABRAS CLAVES:

Drenaje ácido de mina, predicción, prevención, tratamiento

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DESCRIPTION OF THE INTEGRATED MANAGEMENT OF ACID MINE DRAINAGES IN AN INTERNATIONAL SCOPE

AUTHOR(S): Laura Teresa Chaparro Leal

FACULTY: Esp. en Preservación y Conservación de los Recursos Naturales

DIRECTOR: SANDRA NATALIA CORREA TORRES

ABSTRACT

The present work, describe the management and control of acid mine drainage in countries whit high developed mining works such Canada and U.S.A. , where kilometers of rivers are polluted whit heavy metals, acidity, and sediments causing fish displacement and in some cases the aquatic ecosystem death. The scientific research related to mining passives whit environmental impacts, has established an organized way to proceed in AMD approaching that consist in 3 main steps: prediction, prevention and treatment, all of them supported by monitoring tools. The conscientious studies in the different exploration and exploitation steps of the mining works have led to a positive balance over subterraneous and superficial river bodies, due to the decrease of pollution, probably because they're focused on prevention instead of remediation and treatment. In Colombia, the adequate management of mining passives such as acid mine drainages, has not acquired the importance that it deserves, due to the lack of information, the quantification of AMD damages over superficial and subterraneous water sources, and the precarious of the environmental and mining regulation.

KEYWORDS:

Acid Mine Drainage, Prediction, Prevention, Treatment.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de revisión bibliográfica, está enfocado a brindar una orientación en el abordaje de los pasivos ambientales generados en las actividades de explotación minera de metales como oro, plata hierro, cobre y de otros minerales como carbón, y más específicamente hacia la generación, prevención y mitigación de los drenajes de mina.

La característica principal de esta problemática ambiental, es que se produce la contaminación de las aguas y el suelo con metales pesados, elevada acidez y concentraciones de iones como sulfatos durante periodos de tiempo muy prolongados, que pueden oscilar entre días y siglos y una vez generados se dificulta encontrar un punto de retorno a las condiciones originales de los ecosistemas que afectan. Para poder analizar a fondo esta problemática es necesario conocer las causas que lo generan, siendo estas principalmente la exposición de minerales sulfurados reactivos al oxígeno atmosférico y a condiciones de humedad durante los procesos de excavación de tajos, apertura de túneles, inadecuada disposición de estériles y desechos de mina, entre otros.

El interés por realizar la revisión al respecto de este tema, se genera a partir del hecho de que al ser una de las principales políticas de gobierno desarrollar proyectos mineros que favorezcan la economía del país, es necesario contar con gente capacitada no solo para desarrollar las actividades propias de una explotación minera, sino que también esté preparada para enfrentar los retos ambientales que conlleva esta actividad; siendo uno de los más importantes la generación de drenajes ácidos de mina.

La metodología utilizada en el presente trabajo, se basó en la búsqueda de diferentes autores nacionales e internacionales, que trabajan o han trabajado con esta problemática ambiental en diferentes revistas indexadas, en trabajos de grado, y especialmente en los manuales para predicción y manejo de drenajes de

mina, y en las experiencias obtenidas por la red internacional para la prevención de drenajes ácidos a la cual pertenecen países con grandes desarrollos mineros, así mismo, se hizo uso de información adquirida en cursos sobre gestión de cierre de minas y experiencias obtenidas en campo con la mitigación de drenajes ácidos de mina generados por las actividades de explotación artesanal en la región de Soto Norte específicamente el municipio de California.

1. JUSTIFICACIÓN

Los impactos ambientales que generan los drenajes ácidos de mina se encuentran plenamente identificados entre la comunidad internacional, especialmente en países cuya economía se basa en el desarrollo minero o en donde esta es una de las principales actividades de sustento. Sin embargo incluso en países como Canadá, Australia, Estados Unidos y algunos ubicados en África, la generación de DAM (drenajes ácidos de mina) y sus consecuencias se comenzó a estudiar de manera profunda hace poco más de dos décadas aunque ya hubiera sido detectada por científicos como Georgius Agrícola quien describe algo similar en su libro “De Re Metallica” acerca de la devastación de los ríos por causa de las actividades mineras de la época³. Sin embargo, con todos los avances que se han obtenido en el estudio de los drenajes de mina en países industrializados, en países con poco desarrollo minero como Colombia, la problemática aunque es conocida, ha logrado avanzar sin control; ya que la legislación ambiental en el país para controlar los impactos generados por los DAM aún es muy precaria. Así mismo, pocas personas tienen conocimiento de su potencial para causar daño sobre los ecosistemas especialmente los acuáticos, y así poder exigir a las compañías potenciales generadoras de DAM estudios serios y medidos de protección y eficaces en todas las fases de operación, desmonte y abandono de una mina.

Por otro lado el informalismo y la forma ilegal en que algunas explotaciones mineras se han venido realizando durante décadas en el país, especialmente de oro y carbón, ha desencadenado la formación de drenajes ácidos o drenajes neutros con elevadas concentraciones de iones como sulfatos, que hoy en día no se pueden revertir y que fluyen sin control a través de cuerpos hídricos.

El problema principal que comparten hoy en día países industrializados, países cuya actividad minera es esencial como Perú y Chile y países con poco desarrollo minero como Colombia y Ecuador, es que ya se han identificado minas con procesos de acidificación avanzados los cuales son irreversibles y en donde las

comunidades aledañas a los distritos mineros y el estado son los que finalmente adoptan este pasivo ambiental por décadas o incluso siglos. Por esta razón, se hace necesario facilitar información que permita conocer un poco más acerca de esta problemática ambiental para generar acciones que conlleven al desarrollo de una actividad económica con pleno conocimiento de sus impactos y en donde se puedan tomar decisiones a tiempo que eviten agravar la situación actual.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Llevar a cabo una revisión bibliográfica que permita a estudiantes y profesionales de diferentes disciplinas, conocer la problemática y el manejo que hasta ahora se ha dado a los drenajes ácidos de mina; mediante la estructuración de un documento que contenga la recopilación de la información consultada.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar la revisión bibliográfica de diferentes autores que se encuentren trabajando o estén relacionados con el tema de los drenajes ácidos de mina a nivel nacional e internacional.
- Generar un documento escrito que contenga la información consultada en la revisión bibliográfica de forma coherente y organizada.
- Elaborar un aporte personal acerca del manejo de los drenajes ácidos de mina con base en experiencias obtenidas, estudios realizados y la información consultada sobre esta problemática ambiental.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 GENERACIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS EN LA INDUSTRIA MINERA

En la industria minera, se encuentran con frecuencia asociados los sulfuros metálicos de hierro, cobre y arsénico como la pirita, pirrotita, calcopirita, entre otras, a minerales de interés económico como carbón, oro, plata, uranio, diamantes, cobre, entre otros. Durante las excavaciones que se realizan para la construcción de tajos abiertos, apertura de túneles y el almacenamiento de los residuos provenientes del beneficio de los minerales, los sulfuros especialmente de hierro quedan expuestos al oxígeno atmosférico y condiciones de humedad que favorecen su oxidación y generan acidez. Esta generalmente puede ser neutralizada por la presencia de materiales básicos como la calcita y algunos silicatos, sin embargo, una baja disponibilidad de estos minerales ya sea por las condiciones geológicas de la zona o por su eventual agotamiento, puede generar la aparición de drenajes ácidos de mina (DAM) o como también se le denominan drenajes ácidos de roca (DAR).^{1,2} Con la acidificación del agua, se desencadenan algunos procesos biológicos que hacen que este problema permanezca de manera irreversible hasta que se elimine alguno de los componentes que lo causan², adicionalmente es bien conocido que a valores de pH bajos algunos metales pesados como cobre, plomo, cadmio, arsénico, entre otros,¹ son solubles.

Los efectos del drenaje ácido de mina sobre los ecosistemas acuáticos pueden ser devastadores, ya que por ejemplo cuando los peces están expuestos a altas concentraciones de iones H⁺ y metales pesados a través de sus branquias se puede impedir su respiración y por ende causar la muerte. Así mismo, a través de

¹ PRICE A, William. Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials. Canadá. Diciembre, 2009, total version. British Columbia, Canadá. Diciembre 2009. Reporte 1.20.1.

² International Network for Acid Prevention. The GARD Guide. <<http://www.gardguide.com/index.php/>> [citado en 12 de abril de 2014]

su ingesta los peces pueden morir intoxicados ya que en el proceso de oxidación de los sulfuros de hierro como la pirita, se genera hidróxido de hierro que puede cubrir los sedimentos de los cuales algunos de ellos se alimentan, igualmente estos también pueden reducir los espacios limpios utilizados para el desove³.

La industria minera, es en general la principal actividad que contribuye con la generación de drenajes ácidos de mina, ya que en esta se llevan a cabo varias actividades que involucran la exposición de minerales sulfurados al oxígeno y al agua como la interceptación de aguas subterráneas, el acopio de estériles, el almacenamiento de minerales procedentes de la etapa de beneficio, la acumulación de agua en la apertura de tajos, entre otras. Sin embargo, muchas de estas actividades pueden controlarse eficientemente para minimizar el riesgo de formación de DAM,² en la imagen No1 se aprecia el río Tinto, el cual es prácticamente un drenaje ácido generado por causas naturales. La exposición de algunos minerales sulfurados como pirita y pirrotita al oxígeno y al agua, no siempre generan drenajes ácidos de mina, de hecho se conocen 3 tipos que se pueden clasificar en: drenajes ácidos de mina o de roca (DAM o DAR), drenajes neutros de mina (DNM) y drenajes salinos⁴. En términos de pH el drenaje neutro y salino se clasifican por encima de 6 y el drenaje ácido por debajo de este valor y en términos de sólidos disueltos totales el drenaje salino se encuentra por encima de 1000mg/L y el neutro por debajo de este valor⁵. Una manera sencilla de representar estas diferencias gráficamente, se realiza mediante los diagramas de ficklin, en los que se puede apreciar la concentración de iones sulfato por ser los principales aportantes de sólidos disueltos en un drenaje de mina vs el pH (imagen 3) y la suma de los metales presentes en el drenaje vs el pH (imagen 2). La identificación del tipo de drenaje que se esperaría obtener a través de las pruebas de predicción, o que ya se ha adquirido como pasivo ambiental producto de actividades de exposición de sulfuros y su consecuente oxidación, es

³ Reclamation Research Group. Acide Mine Drainaje and Effects on Fish Health and Ecology: A Review. Anchorage, Alaska. Junio, 2008. 99501.

⁴GESTIÓN EN CIERRE DE MINAS. Perú. Cámara Minera del Perú. 2013 [diapositivas]

⁵ PRICE A. Op. cit., p. 17

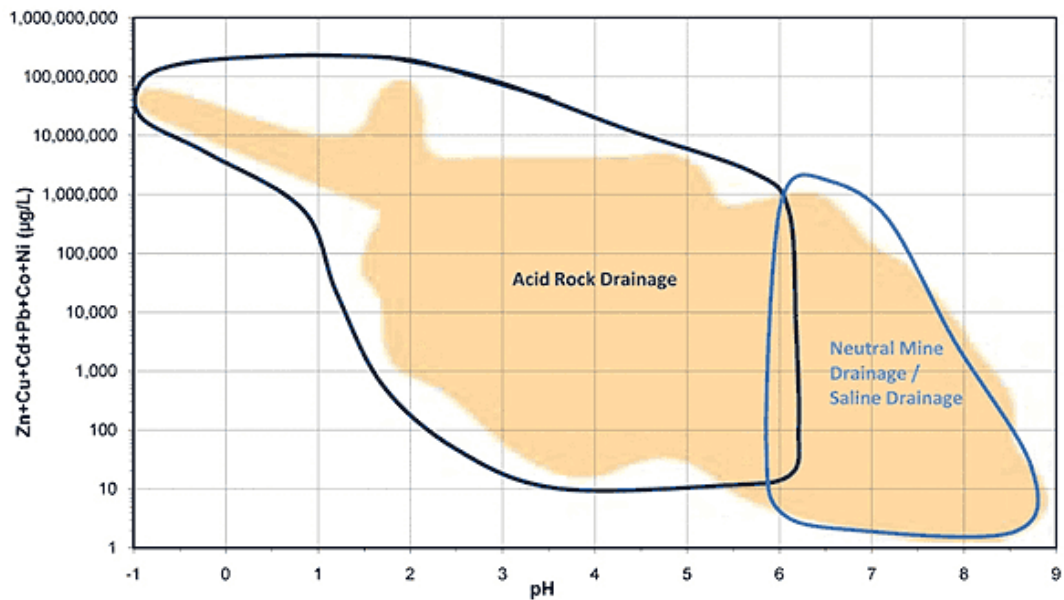
indispensable para decidir sobre el tipo de medidas de prevención, mitigación y remediación que se deben tomar para enfrentar esta problemática.

Imagen 1. Drenaje ácido Natural Río Tinto España



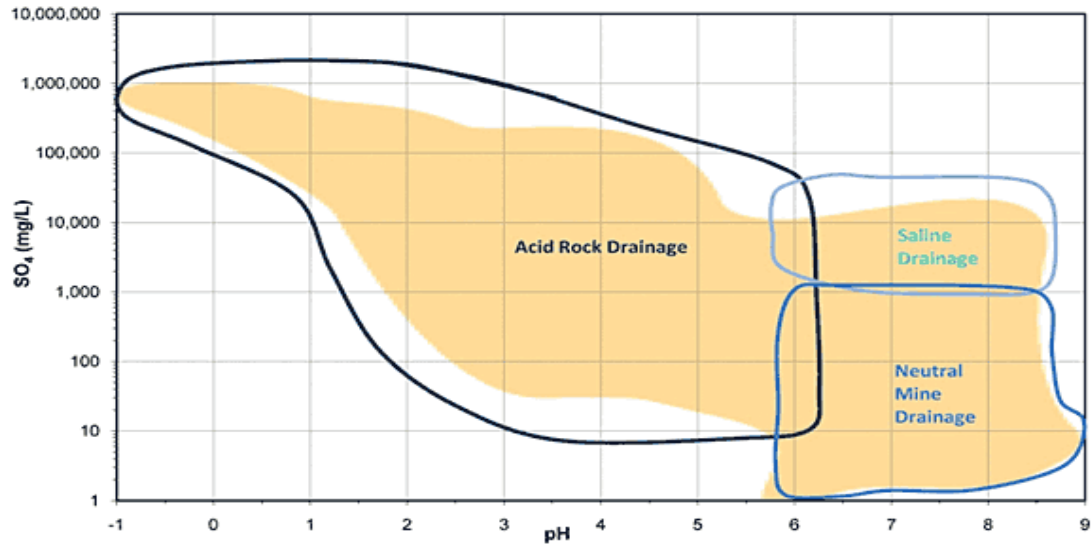
Fuente: <http://www.fotocommunity.es/pc/pc/display/24940855>

Imagen 2. Clasificación de los posibles drenajes de roca en términos de la concentración de metales disueltos y el pH



Fuente: International Network for Acid Prevention

Imagen 3. Clasificación de los posibles drenajes de mina o de roca en términos de la concentración de iones sulfato y el pH



Fuente: International Network for Acid Prevention

Una vez conocidos los tipos de drenajes que se pueden generar a través de la oxidación de algunos sulfuros metálicos, se debe conocer la manera en que estos se producen, sus respectivas etapas de formación y los principales elementos que influyen en estos procesos.

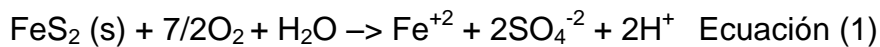
3.1.1 Formación

El proceso de formación de un drenaje ácido comienza por la oxidación de los minerales sulfurados como la pirita y pirrotita con la acción del oxígeno atmosférico y el agua tal como se aprecia en la ecuación 1.

- La pirita o sulfuro de hierro, es oxidada al entrar en contacto con oxígeno atmosférico y agua.^{6,7,8}

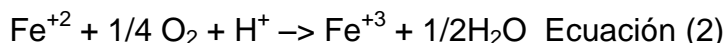
⁶ PEREZ VEGA, William y ORTIZ PEÑA, Javier. Manejo de Drenajes Ácidos de Mina. Trabajo de Grado Especialista en Ingeniería Ambiental. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico- químicas, 2009.

⁷ MORENO JEREZ, Raúl y JIMENEZ JAIMES, Jazmín Rocío. Mejoramiento del Actual Tratamiento Activo y Propuesta de un Método Pasivo para el Manejo de Drenajes Ácidos en el Distrito Minero Auroargentífero

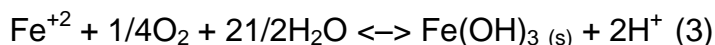


En la ecuación N°1, el azufre contenido en la pirita es oxidado para generar iones sulfato mientras que el oxígeno es reducido, es decir en esta fase inicial el oxígeno atmosférico es el principal agente oxidante y el hierro conserva su estado de oxidación original.^{6,7}

- Posteriormente el ión ferroso es oxidado a ión férrico cuando está en presencia de suficiente oxígeno disuelto en el agua o está expuesto al oxígeno atmosférico (ecuación 2)⁶



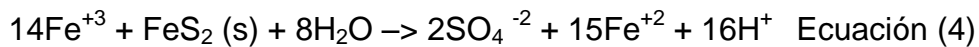
- El ión ferroso puede posteriormente oxidarse y subsecuentemente hidrolizarse para generar un precipitado en forma de hidróxido de hierro el cual es de color rojo- naranja, muy característico de las zonas que son afectadas por la formación de drenajes de mina, este proceso sucede generalmente a valores de pH entre ligeramente ácidos a alcalinos (ecuación N°3)⁸.



- Sin embargo a valores de pH bajos (por debajo de 4,5) ocurre la reacción de oxidación de pirita promovida por el hierro férrico que en este caso actúa como el principal agente oxidante reemplazando al oxígeno atmosférico (ecuación N° 4).

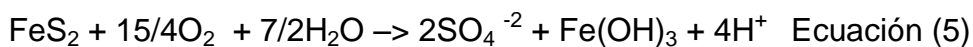
Vetas – California (Santander). Trabajo de Grado Especialista en Ingeniería Ambiental. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico- químicas, 2012.

⁸ POSADA OTÁLORA, Luz Mery. Estudio de las Principales Técnicas de Remediación de Efluentes Líquidos Contaminados por Drenajes Ácidos de Minas de Oro en Colombia. Trabajo de grado Especialista en Química Ambiental. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias, 2011.



Durante este paso suele haber una confusión respecto a la ecuación N°4, debido a que algunos autores reportan que en esta etapa ya no es necesaria la presencia del oxígeno atmosférico para oxidar la pirita, sin embargo, se debe tener en cuenta que el hierro férrico debe provenir constantemente de la oxidación del ión ferroso por parte del oxígeno que siempre debe estar presente en estos procesos para que se lleven a cabo.

- Por último si se combinan las ecuaciones 1 y 3, se obtiene un proceso de oxidación de pirita (ecuación N° 5) que sucede a valores de pH > 4.5 en donde se genera el doble de acidez de la obtenida en el proceso descrito en la ecuación N°1.



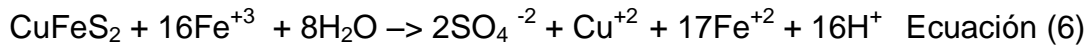
Aunque la pirita es el principal mineral que al exponerse al agua y al oxígeno genera acidez, en depósitos por ejemplo de minería de oro también se encuentran otros sulfuros que pueden generarla la como marcasita y pirrotita; por el contrario otros minerales sulfurados como esfalerita, galena y calcopirita no generan acidez en contacto con el oxígeno. En general los minerales sulfurados cuyo radio metal/azufre es <1 generan acidez y los sulfuros cuyo radio metal/azufre es =1 no lo generan⁹.

FeS_2 (pirita) relación metal/azufre $\rightarrow 1/2$ que es <1 entonces generará acidez

CuFeS_2 (calcopirita) relación metal/azufre $\rightarrow 2/2 = 1$ no generará acidez por oxidación con oxígeno.

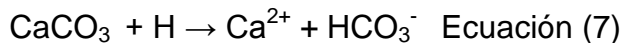
Sin embargo si el principal agente oxidante es el ión férrico presente en disolución, este es capaz de oxidar cualquier sulfuro a valores de pH bajos (ecuación N°6).

⁹ International Network for Acid Prevention. Op. cit., p. 17



3.1.2 Procesos Naturales de Neutralización

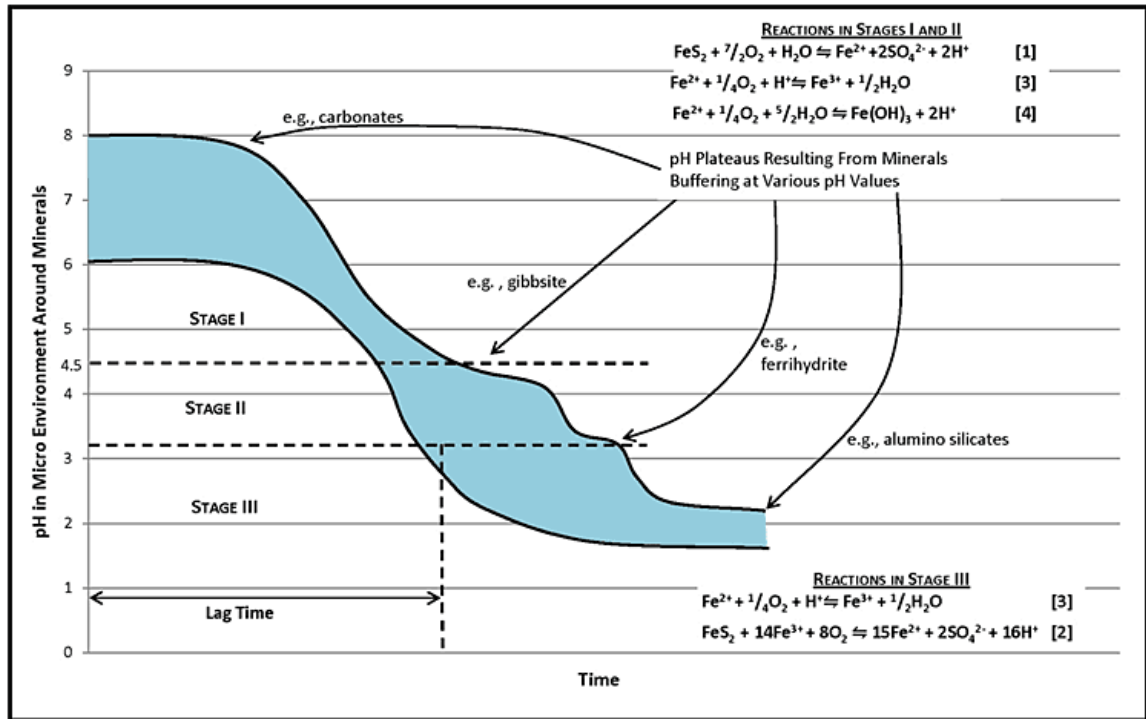
Los procesos naturales de neutralización de drenajes de mina juegan un papel muy importante en las diferentes etapas de acidificación de los mismos, ya que estos son los que mantienen el agua con valores de pH cercanos a la neutralidad evitándose la disolución de metales pesados que generan el principal impacto ambiental sobre los ecosistemas receptores. Los minerales neutralizantes que también se pueden encontrar en los depósitos con sulfuros son los carbonatos como la calcita y dolomita (ecuación N° 7 y 8), los aluminosilicatos como la plagioclasa, biotita y los k-feldespatos (ecuación N°9)



Teniendo en cuenta los procesos de acidificación y neutralización de los drenajes de mina en donde los minerales sulfurados como la pirita se exponen al oxígeno atmosférico y al agua, las etapas antes descritas en las que se forma un DAM o DAR se ilustran en la imagen 4. En la primera y segunda fase de la formación del drenaje se llevan a cabo las reacciones de oxidación del azufre de la pirita a iones sulfato y la oxidación del ion ferroso a ion férrico para formar precipitados rojo-naranjas en forma de hidróxidos, el pH para la primer etapa se encuentra por encima de 4,5 y para la segunda etapa entre 3 y 4,5. Durante la etapa 3 se generan preferencialmente las reacciones de oxidación de hierro ferroso a hierro férrico para quedarse en disolución y posteriormente promover la oxidación de la

pirita mostrada en la ecuación No4, el valor de pH se encuentra en valores entre 3 y 1 aproximadamente¹⁰.

Imagen 4. Etapas de acidificación de un drenaje de mina o de roca.



Fuente: International Network for Acid Prevention

3.1.2 Factores Biológicos

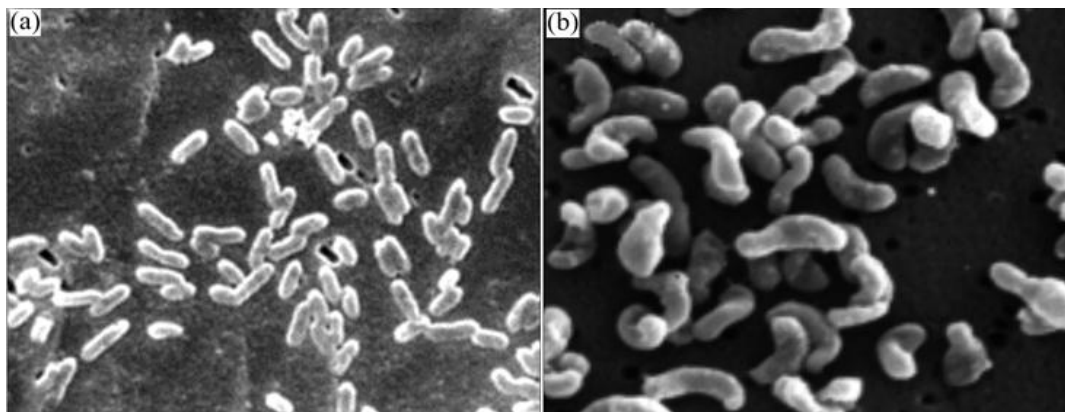
En los procesos de oxidación de minerales como la pirita no solo intervienen procesos químicos sino que también procesos biológicos, especialmente en la fase 3 de la formación de DAM, el proceso se lleva a cabo preferencialmente por oxidación biológica más que por la vía química¹¹; de hecho se ha comprobado que cuando existe la presencia de bacterias que oxidan hierro, la cinética del proceso se puede aumentar por valores de 10^6 o más en comparación a las condiciones

¹⁰ Ibid., p. 23.

¹¹GLEISNER, Magdalena; HERBERT Jr, Rogner y FROGNER KOKCUM, Paul C. Pyrite Oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans* at Various Concentrations of Dissolved Oxygen. *En: Chemical Geology*. 2006. Vol 225, p 16-29.

abióticas.^{12,13} En la imagen 6, se resumen algunos aspectos concernientes a la catálisis biológica de la oxidación de minerales sulfurados en drenajes ácidos de mina. En general, las bacterias que intervienen en este proceso requieren de un pH óptimo que oscila entre 1 y 4, crecen autotróficamente obteniendo su energía de la oxidación del hierro ferroso o del azufre en el caso de la *A. thiooxidans* utilizando al oxígeno como aceptor de electrones bajo condiciones oxidantes,¹⁴ así mismo, los principales requerimientos nutricionales de estas bacterias son el nitrógeno, el CO₂ y en menor grado el fósforo. El principal problema de llegar a la fase en la que las bacterias catalizan la oxidación de hierro y por ende se genera acidez, es que en este punto el proceso se hace irreversible y solamente se pueden tomar medidas de remediación para evitar la contaminación de los ecosistemas. En la imagen 5 se pueden observar algunas bacterias presentes en los drenajes ácidos de mina.

Imagen 5. Bacterias presentes en drenajes ácidos de mina. A) *Acidithiobacillus ferrooxidans*, B) *Leptospirillum ferrooxidans*.



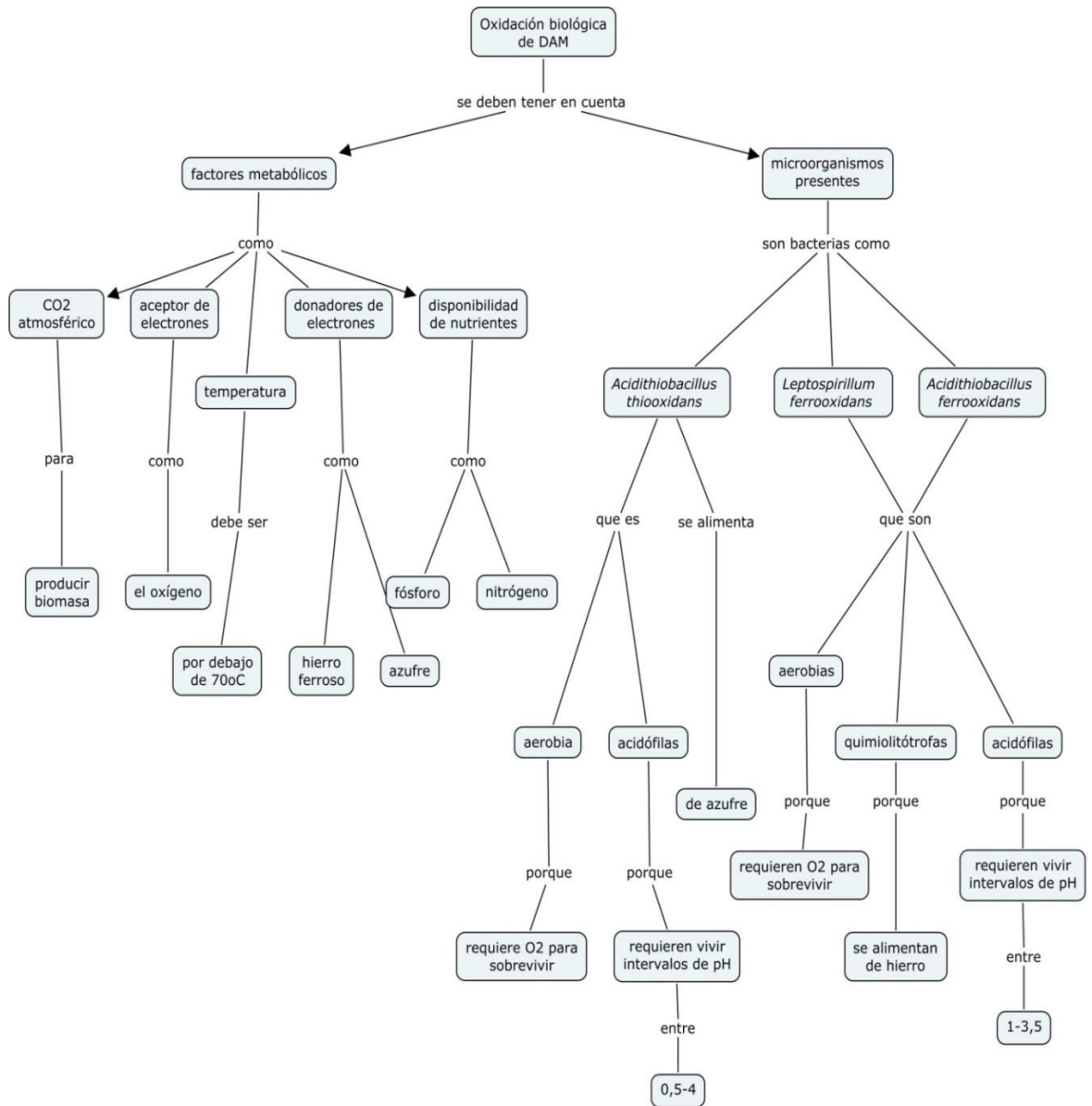
Fuente: NATARAJAN, K.A. Microbial Aspects of Acide Mine Drainage and its Bioremediation.

¹² NATARAJAN, K.A. Microbial Aspects of Acide Mine Drainage and its Bioremediation. En: Transaction of Nonferrous Metals Society of China. Noviembre 2008. Vol 18, p 1352 – 1360.

¹³ MAHMOUD K.K; LEDUC, L.G. y FERRONI, L.C. Detection of *Acidithiobacillus ferrooxidans* in Acid Mine Drainage Environments Using Fluorescent in situ Hybridization (FISH). En: Journal of Microbiological Methods. 2005. Vol 61, 33-45.

¹⁴ NATARAJAN, K.A.; SUBRAMANIAN, S y BRAUN, Jean Jaques. Environmental Impact of metal Mining- Biotechnological Aspects of Water Pollution and Remediation – an Indian Experience. En: Journal of Geochemical Exploration. 2006. Vol 48, p 45 – 48.

Imagen 6. Principales factores que se deben tener en cuenta en la oxidación biológica de drenajes ácidos de mina.



Fuente: el autor

3.2 IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR LOS DRENAJES ÁCIDOS DE MINA

La generación de drenajes ácidos a partir de las diferentes unidades operativas de las compañías mineras, se ha identificado como uno de los mayores y más costosos problemas que estas tienen que enfrentar dado sus impactos ambientales. Entre los más generales se encuentran:

- la contaminación de aguas subterráneas y superficiales ya que la disolución de metales pesados y la extrema acidez hacen que se extinga casi cualquier tipo de vida acuática presente en los cuerpos receptores. Por ejemplo en la zona minera de Avoca¹⁵ se encontró que no había presencia de peces en la parte baja del río (justo debajo de la zona minera) y que a medida que el río transcurría a través de la zona minera se observaba una disminución en la calidad del agua, su biodiversidad y productividad¹⁶.
- Adicionalmente a la acidez, los precipitados de hierro y sulfatos presentes en los DAM son acumulados en los substratos y destruyen el hábitat natural de las especies ya que obstruyen sus sitios de alimentación dañando las macrófitas y cubriendo los detritos de los cuales se alimentan algunos peces (en la imagen 7 se aprecia la imagen de un drenaje de mina que impacta a su cuerpo hídrico receptor).
- Por otra parte, algunos minerales de sulfatos forman compuestos que se infiltran a través de fracturas hacia las aguas subterráneas generando la disolución de metales pesados que se desplazan causando efectos adversos sobre los ecosistemas e inclusive la salud humana¹⁷.

¹⁵ GRAY, N. F. Acid Mine Drainage Composition and the Implication for its Impacts on Lotic Systems. En: Pergamon. November 1997, vol 32, p 2132 – 2134.

¹⁶ NATARAJAN. Op. cit., p. 25

¹⁷ SILVA, Luis F.O., et al. Study of environmental pollution and mineralogical characterization of sediment rivers from Brazilian coal mining acid drainage. En: Science of the Total Environment. February 2013, Vol 447, p 169 – 178.

- Aunque la principal afectación de los drenajes de mina se aprecia sobre los ecosistemas acuáticos, en algunas ocasiones la vegetación a través de la cual transcurre el agua antes de llegar a los cuerpos hídricos se ve afectada, pues los elevados niveles de metales como aluminio, cobre, arsénico, entre otros, intoxican las plantas e inhiben su crecimiento.¹⁸ Tal es el caso de la mina Witbank en Sur África en donde se observa que casi toda la vegetación existente ha desaparecido principalmente por causa de las elevadas concentraciones de aluminio en el agua de drenaje que superan los 100 mg/L.

Imagen 7. Cuerpo de agua impactado por un DAM



Fuente: el autor

3.3 POTENCIALES RECURSOS GENERADORES DE DRENAJES ÁCIDOS

En general las operaciones mineras son las principales causantes de la formación de drenajes ácidos de mina, ya que en ellas se lleva a cabo la remoción de grandes volúmenes de tierra que posteriormente ya sea como estériles, o como residuos provenientes de los procesos de beneficio de los minerales serán

¹⁸ BELL, F.G., et al. Environmental impacts associated with an abandoned mine in the Witbank Coalfield, South Africa. En: International Journal of Coal Geology. 2001. Vol 45, p 195 – 216.

acopiados por tiempos prolongados. Durante estos procesos se produce la exposición de los minerales sulfurados a la atmósfera y al agua, a través de la excavación de tajos en el caso de la minería a cielo abierto, apertura de túneles en el caso de la minería subterránea, almacenamiento de estériles de mina procedentes del material que es removido pero que no es procesado dada su baja ley con respecto al mineral de interés (botaderos), los relaves y sitios de acopio temporales,¹⁹ En la imagen 8 se esquematizan los principales recursos en los que se pueden generar drenajes ácidos de mina durante una operación minera.

Imagen 8. Recursos de generación de DAM.



Fuente: el autor

3.3.1 Minas a Cielo Abierto

Los depósitos Mineros relativamente poco profundos o los cuerpos mineralizados muy extensos, generalmente requieren de operaciones mineras a cielo abierto, en donde se llevan a cabo labores como la voladura, excavación y transporte del material estéril y de la mena²⁰. Generalmente con el desarrollo de explotaciones a cielo abierto, se alteran los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, ya que las labores de voladura generan fracturas que afectan las propiedades hidráulicas de la roca madre y se pueden ver afectados los patrones de drenaje del agua subterránea. Adicionalmente, cuando las operaciones dentro del tajo finalizan los

¹⁹ Ibid., p. 28.

²⁰ International Network for Acid Prevention. Op. cit., p. 17

trabajos de drenado de agua de escorrentía superficial y subterránea también cesan y puede generarse un lago en el fondo del tajo con características ácidas debido a escurrimientos con altos contenidos de sulfuros o al llenado del mismo con material reactivo. En la imagen 9 se aprecia un tajo abierto con la formación de un lago con minerales disueltos en su interior.

Imagen 9. Mina a cielo abierto.



Fuente: <http://consciencia-global.blogspot.com/2010/06/mineria-cielo-abierto.html>

3.3.2 Minas Subterráneas

Al igual que en los tajos abiertos, en los trabajos subterráneos las labores de voladura y extracción también generan la exposición de minerales sulfurados reactivos al contacto con el oxígeno atmosférico y el agua proveniente ya sea de los sistemas de recarga regionales o locales que son constantemente alimentados por las precipitaciones. Por ende, para las minas subterráneas también se requiere de la conducción del agua hasta pozos o sitios de descarga o en diversas ocasiones esta puede ser utilizada en las operaciones de beneficio de los minerales. Sin embargo La calidad del agua durante su estadía en la mina se

puede ver alterada si no se realizan obras de mitigación para evitar la oxidación de los sulfuros, así mismo cuando las labores de la mina subterránea son abandonadas, las labores de drenado también son suspendidas y en este punto es que se intensifican los procesos de transporte de metales pesados hacia los cuerpos hídricos receptores sin ningún tipo de control, en la imagen 10 se muestra el proceso de oxidación de pirita dentro de un túnel de explotación antiguo en California Santander.

Imagen 10. Sulfuros en proceso de oxidación en mina subterránea.



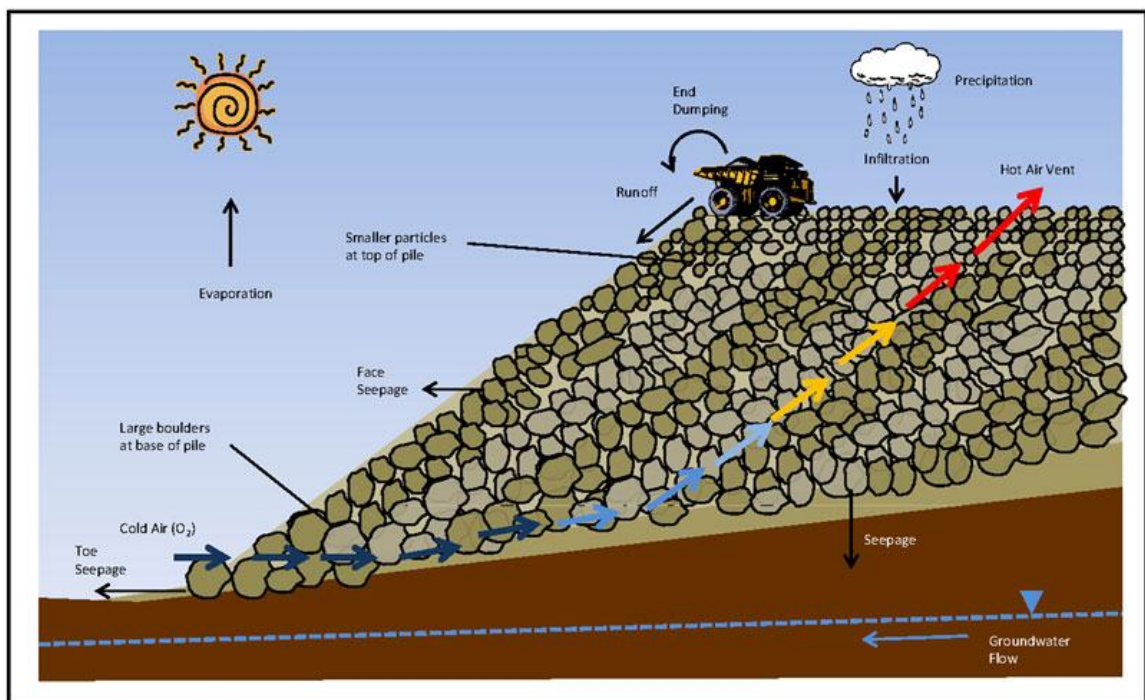
Fuente: el autor

3.3.3 Botaderos de Estériles o Sitios de Acopio

Los lugares donde se almacenan ya sea temporal o permanentemente los estériles de mina que no son procesados en las labores mineras, a menudo son medios altamente heterogéneos, muy reactivos y porosos, en los cuales se observa la generación de drenajes ácidos de roca que se infiltran a las aguas subterráneas. En la imagen 11, se muestra la incorporación de oxígeno y agua a los botaderos y sitios de acopio temporal. Por otra parte, las constantes

vibraciones de los vehículos que depositan el estéril así como los procesos de descarga del mismo, generan la segregación del material en capas unas de roca más gruesa y otras más fina; favoreciendo la generación de DAM a través de la promoción de la oxidación de la roca, lo cual hace que estos botaderos requieran periodos largos de mantenimiento y monitoreo²¹.

Imagen 11. Entrada de aire y agua a los botaderos de estéril o sitios de acopio temporal.



Fuente: International Network for Acid Prevention

3.3.4 Relaves de Mina o Residuos Provenientes del Proceso de Beneficio

Los residuos correspondientes a los procesos de beneficio de minerales, generalmente son dispuestos de dos maneras, secas o en forma de pasta (con un porcentaje de humedad), estos poseen un mayor grado de homogenización comparado con los estériles de mina, ya que generalmente la roca ha tenido que ser previamente triturada para la extracción del mineral de interés. Este grado de

²¹ Ibid., p. 29.

homogenización limita la entrada de oxígeno y de agua hacia el interior y evita que puedan entrar en contacto con los sulfuros reactivos, sin embargo, en los sitios o épocas en que se presenta una elevada tasa de pluviosidad, si los residuos no están adecuadamente cubiertos el agua se infiltra y arrastra metales pesados y también puede promover la generación de DAR²².

²² Ibid., p. 32.

4. MANEJO DE LOS DRENAJES DE MINA

El manejo de drenajes ácidos de mina, comprende el entendimiento de diversos procesos como son su generación, movilidad, afectaciones en el medio ambiente, en la salud y la atenuación de sus impactos. En general a nivel global se ha aceptado el manejo de los drenajes a través de 3 mecanismos principales:

- Su predicción, para determinar de forma temprana que materiales provenientes de una mina podrían ser generadores de drenajes ácidos.
- Su prevención mediante el uso de técnicas que permitan evitar su formación una vez identificada la presencia de materiales potenciales generadores de ácido
- Su tratamiento para el caso de los pasivos ambientales provenientes de las actividades mineras desarrolladas en el pasado, o para aquellas actividades que no son planificadas adecuadamente y que generan este impacto. Todas estas fases vienen acompañadas de actividades de monitoreo que permiten determinar el estado y la eficacia de las técnicas implementadas ya sea para predicción, prevención y mitigación.

4.1 PREDICCIÓN

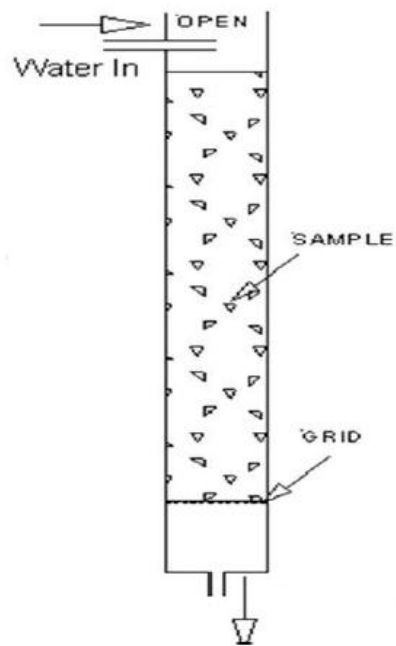
La predicción de la posible formación de drenajes ácidos de mina, tomó importancia e interés hacia la década de los 80s y esta se ha venido incrementando con el paso del tiempo, ya que entidades como la EPA hallaron tan solo hacia el año 1993 que en el este de los Estados Unidos se estarían afectando alrededor de 7000km de fuentes hídricas superficiales con drenajes ácidos y entre 8000 y 16000 km en la parte oeste.

De esta manera Estados Unidos y otros países con grandes explotaciones mineras, notaron que los DAM no solo generan graves impactos ambientales, sino que también representaban un costo muy alto durante su tratamiento, ya que la duración de los mismos es casi a perpetuidad en algunos casos. Así las cosas, a la fecha se han desarrollado dos grupos de ensayos para predecir la generación de DAM: los test estáticos y los cinéticos. Entre los principales test estáticos se encuentra el ABA que sirve para conocer la generación de ácido-base, el pH pasta de la matriz, el potencial neto de generación de ácido, y de base. Así mismo, de igual manera entre los ensayos cinéticos que se han desarrollado para predicción de drenajes ácidos se encuentran el Test de celda húmeda, la extracción Soxhlet, las columnas de Lixiviación (ver imagen 12), y el test de Confirmación de British Columbia, que está orientado a determinar si las bacterias que participan en los procesos de generación de DAM como las Thiobacillus ferrooxidans, son capaces de generar suficientes reacciones como para satisfacer su demanda de ácido²³.

A pesar de todas las técnicas desarrolladas a escala de laboratorio, los investigadores conocedores de este tema sugieren que los mejores resultados se obtienen cuando se ejecutan ensayos a escala de campo, por ejemplo se han implementado celdas que permiten el uso de una mayor cantidad de muestra, hasta 1000 ton métrica o superior, generalmente en el mismo sitio donde se desarrolla la explotación minera. Las condiciones climatológicas especialmente la pluviosidad son de gran importancia para estos test, ya que estas intervienen en los procesos de lixiviación de los minerales hacia las fuentes hídricas receptoras, en la imagen 13 se observan las adecuaciones de un test de campo para determinación de procesos de generación de DAM.

²³ PRICE A. Op. cit., p. 17

Imagen 12. Columna de lixiviación.



Fuente: Mend Manual. Prediction. Canadá. Diciembre,2009, vol 3

Imagen 13. Test a escala de campo para identificación de formación de DAM



Fuente: Mend Manual. Prediction. Canadá. Diciembre,2009, vol 3

Con el objetivo de conocer las diferencias entre las propiedades fisicoquímicas del agua al realizar los test cinéticos de campo y de laboratorio, se analizan los resultados obtenidos por PLANTE, et al.²⁴ En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos por los autores para los diferentes test cinéticos realizados, y en la imagen 14 se muestran las tasas de lixiviación de los componentes de estudio.

Tabla 1. Comparación de resultados obtenidos entre test cinéticos de laboratorio y de campo.

Parámetro	Columna inundada	Celdas Húmedas	Columnas de Lixiviación	Test de Campo
pH	6.5-8.5	6.5-8.5	6.4-7.6	5.5-8.0
T°C	22	22	22	10,6
Tamaño de partícula	<500µm	<6.3mm	<5.0cm	<50cm
Conductividad (µS/cm)	10-30	10-30	100-200	100-400
Ca (mg/L)	0.8-2	0.8-3	15-30	15-70
Fe (mg/L)	0.006-0.09	0.006-0.09	<0.0006	0.006-1.0
Mg(mg/L)	0.2-0.8	0.2-0.6	1.0-3.0	2.0-22
Ni(mg/L)	<0.03	<0.03	0.02-0.05	0.1-3.2
S(mg/L)	0.1-10	0.1-2.3	10-30	10-55
Si(mg/L)	10-100	2.0-20	1.0-6.0	3.0-10

Fuente: Plante, et al.

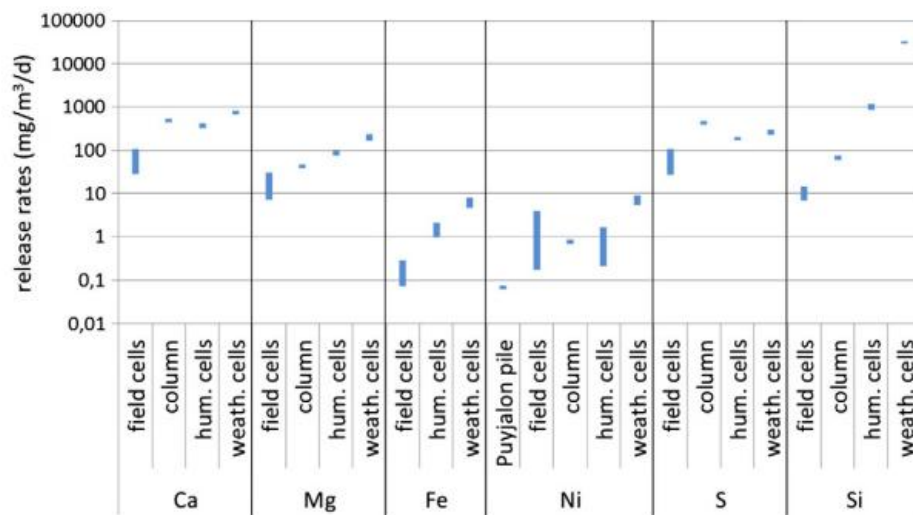
De la tabla 1, se pueden observar las diferencias en las concentraciones obtenidas para los test cinéticos, en ella se aprecia que la conductividad, los parámetros como Ca, Mg, S, y Si, difieren ampliamente entre los test de extracción y celdas húmedas, vs los de campo siendo estos últimos siempre mayores; por otra parte el test de columnas de lixiviación fue el que más se aproximó a los datos obtenidos en campo. Estas diferencias pueden deberse a muchos factores, uno de los más relevantes es el tamaño de las rocas utilizadas, ya que este varió significativamente entre los diferentes ensayos, la relación líquido/sólido, las condiciones climáticas en los ensayos de campo, entre otros. Sin embargo, el pH

²⁴ PLANTE, B; et al. Lab To fiel Scale Effects on Contaminated Neutral Drainage Prediction from the Tio Mine Waste Rocks. En: Journal of Geochemical Exploration. November, 2013. Vol 137, p 37- 47.

osciló entre valores de 5,5 y 8,5 y todos registraron un comportamiento neutro para el agua sin ningún evento de acidificación relevante.

Adicionalmente a la caracterización fisicoquímica del agua, los autores también estudiaron las tasas de lixiviación de los diferentes componentes encontrándose para el Ca (28-833mg/m³d), Mg (7,1-235 mg/m³d), Fe (0.07-8 mg/m³d), S (27-470 mg/m³d), Ni(0.06-3.9 mg/m³d) y Si (6.8-33 mg/m³d), encontrándose casi siempre mayores para los test de laboratorio que para los de campo, debido principalmente a el efecto de la temperatura en la tasa de oxidación de pirita ya que todos los test se encontraban a 22°C y el de campo a 10,6°C y esta razón se aumenta por un factor de 4,4 al pasar de 10°C a 22°C²⁴. Esta información es de gran relevancia, ya que se puede inducir a errores en las modelaciones de campo, pues para un sitio más frío que las condiciones de laboratorio la tasa de oxidación de pirita y por ende de lixiviación de metales será más baja que la predicha por dichos ensayos.

Imagen 14. Tasa de Lixiviación de componentes de un estéril de mina.



Fuente: Plante, et al.

Toda vez que se ha llevado a cabo el desarrollo de diferentes test estáticos y cinéticos para la predicción de la posible generación de DAM, se hace necesario ejecutar una serie de actividades para prevenir su formación, en los casos en los que los análisis sugieren la formación del pasivo ambiental. De esta manera se

entra a la fase de prevención que está encaminada a minimizar todas las posibles variables que puedan originar procesos de oxidación de sulfuros y acidificación de las aguas.

4.2 PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS

La etapa de prevención, mitigación y formación de drenajes ácidos, es quizá una de las más importantes para un proyecto de exploración y explotación minera, ya que la implementación de técnicas adecuadas permitirá reducir costos por tratamiento a mediano y largo plazo, así mismo, también evitará la contaminación del suelo y del recurso hídrico y la generación de enfermedades de las comunidades que se puedan ver afectadas por la formación de DAM.

En general la prevención para la generación de DAM, está encaminada a reducir o eliminar los efectos de alguno de los componentes que participan en los procesos de oxidación de sulfuro ya sea el agua o el oxígeno atmosférico, adicionalmente las técnicas de prevención y mitigación tienen en cuenta los factores climáticos del sitio en donde se desarrolla la mina, el tipo de depósito, la geoquímica, la topografía, la hidrogeología, los ecosistemas acuáticos y terrestres presentes en el área de influencia, las regulaciones minero- ambientales, riesgos, costos, requerimientos de mantenimiento, entre otros²⁵. A continuación se describen algunos de los métodos de manejo que se han desarrollado y que han sido efectivamente probados en campo para prevenir la generación de drenajes ácidos, teniendo en cuenta que no existe una solución universal para prevenir y mitigar sus impactos y que las metodologías se escogen de acuerdo a las necesidades y disponibilidad de recursos de cada proyecto.

²⁵ International Network for Acid Prevention. Op. cit., p. 17

4.2.1 Métodos Especiales de Manejo

Estos métodos permiten el uso de diferentes técnicas fisicoquímicas para la minimización de la formación de drenajes de mina, en la tabla 2 se describen algunos de los métodos más utilizados.

Tabla 2. Métodos especiales de manejo para prevención de formación de DAM

Método de Manejo	Descripción
Clasificación	Separación del material no reactivo para facilitar labores y reducir costos de operación.
Desulfurización	Minimización del contenido de sulfuros mediante procesos de flotación para reducir el potencial de generación ácido. Generalmente estos se aplican durante el proceso de beneficio de minerales como el cobre y oro.
Mezclado	Esta técnica se basa en la adición de material neutralizador de acidez como roca con altos contenidos de carbonato de calcio, que al ser adecuadamente mezclados con el material generador de acidez, permiten la descarga de un efluente de calidad aceptable
Adición de Enmienda	Estos métodos generalmente buscan disminuir la reactividad superficial de los minerales, que es el sitio en donde generalmente se inicia el proceso de acidificación, generalmente se utiliza permanganato de potasio y la mezcla fosfato peróxido, para oxidar el hierro ferroso y generar cubiertas protectoras.
Adición de Materia Orgánica	La materia orgánica puede ser directamente mezclada con el material reactivo, para consumir oxígeno y de esta forma favorecer la reducción de los metales y sulfatos en un ambiente anóxico promovido por bacterias. Con la adición de material como lodos del tratamiento de aguas municipales, se puede favorecer la precipitación de sulfuros metálicos que dejan de estar disponibles para los ecosistemas.
Uso de Bactericidas	Como los surfactantes aniónicos, que son ampliamente utilizados en minas de carbón en pilas de desecho de material frescas o antiguas.
Deshidratación	Esta técnica se basa principalmente en la recolección de agua subterránea dirigiéndola hacia un sitio específico por bombeo, evitando su mezcla con minerales reactivos generadores

	de DAM.
Aplicación de Controles Hidrogeológicos e Hidrodinámicos	esta técnica busca aislar las aguas lluvia y las aguas superficiales de los sitios en donde se encuentran los minerales reactivos generadores de DAR, para ello normalmente se utilizan canales impermeables, zanjas de coronación, canalización aguas arriba de los sitios de almacenamiento de minerales. Ver imagen 15.
Uso de Sellos	El uso de sellos es especialmente utilizado para las minas subterráneas, al interior de los túneles se deben conocer exactamente los puntos de ingreso de agua y posteriormente canalizarlos para evitar el arrastre de minerales y el deterioro de la calidad del agua. En los puntos donde se hacen perforaciones se pueden utilizar sellos especiales que impiden el paso de oxígeno hacia el interior y de agua hacia el exterior, por otra parte en la mayoría de los casos se utiliza la técnica de concreto lanzado que cubre los minerales reactivos y los protege del contacto con el oxígeno y el agua.

Fuente: International Network for Acid Prevention

Imagen 15. Relaves con Obras para el manejo y aislamiento de aguas lluvia



Fuente: GESTIÓN EN CIERRE DE MINAS. Perú. Cámara Minera del Perú

Con el objetivo de restaurar, remediar o recuperar las áreas explotadas en las labores mineras, se han desarrollado estrategias adicionales a los métodos especiales de manejo como el uso de cubiertas secas y húmedas, que han permitido dar otro uso al suelo o al agua después del cese de actividades de explotación.

4.2.2 Cubiertas secas

Las cubiertas secas están hechas por lo general de materia orgánica, barro o materiales sintéticos o geosintéticos, puestas sobre los minerales reactivos, su propósito principal es evitar la generación de acidez, lixiviación de metales y transporte hacia el medio ambiente; adicionalmente también están hechas para el desarrollo de capa vegetal y control de erosión. Las cubiertas secas deben estar diseñadas de tal manera que permitan un nivel de control adecuado teniendo en cuenta las condiciones específicas de cada lugar, en el largo plazo estas deben interactuar con el clima, la hidrología, los asentamientos humanos cercanos, la vegetación, los animales y la estabilidad del mineral que se encuentran recubriendo²⁶. En la presente sección se enuncian algunas de las cubiertas más utilizadas en la industria de la minería.

a) Cubiertas con Suelo: estas cubiertas generalmente están hechas de materiales granulares puestos sobre el material reactivo, su principal objetivo es la mitigación de ARD, la dispersión de polvo, el control de erosión y la provisión de un medio de sustento para el crecimiento de vegetación²⁶. Habitualmente las cubiertas consisten en una capa de material granular monolítico bien graduado, con suficiente capacidad de almacenamiento de la humedad para evitar el paso de las aguas meteóricas hacia el interior de los minerales reactivos. En algunos casos el material inerte sacado de la misma mina puede funcionar como cubierta de suelo, sin embargo este debe ser bien compactado y llevado a un tamaño

²⁶ Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería. España. 2004, p 112-116.

específico para evitar la entrada oxígeno, agua y la formación de canales preferenciales. Un aspecto muy relevante a tener en cuenta en las barreras con suelo, es la capa superior que sustenta la vegetación, ya que si esta no se mantiene en el tiempo y se ve afecta por las condiciones climáticas del sitio, disminuirá el desempeño de las capas inferiores. En la imagen 16 se muestran los diferentes factores que afectan las cubiertas con suelo, en la imagen 17 se muestran diferentes tipos de cubiertas que se utilizan para los residuos mineros.

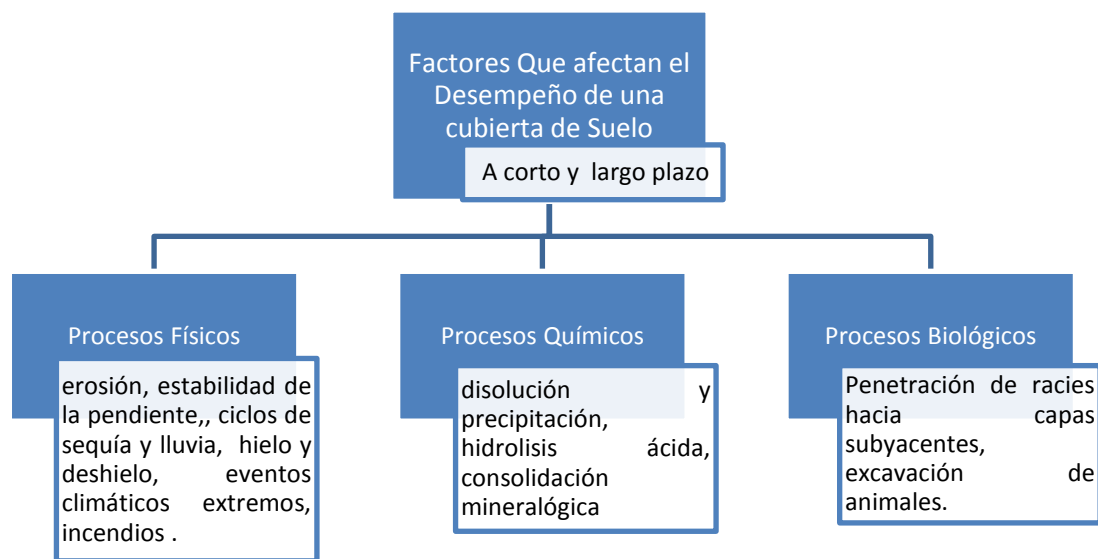
b) Uso de Vegetación: el establecimiento de vegetación es usualmente un factor crítico en los trabajos de cierre de minas, su principal objetivo es el control de erosión, favorecer la evapotranspiración, permitir un uso de la tierra después de finalizadas las labores mineras, y la recuperación, o restauración de los ecosistemas. El rendimiento de una cubierta vegetal depende de muchos factores como la densidad de la capa vegetal, la profundidad de enraizamiento disponible, y la composición de las especies. Por lo general las especies nativas son las que mejores rendimientos tienen a largo plazo, sin embargo, las cubiertas vegetales que se usan representan uno de los principales puntos de discusión con respecto al desarrollo de actividades mineras, ya que en reiteradas oportunidades no se logran reproducir las especies nativas, se favorece la llegada de especies invasoras, y lo más importante no se logra restaurar los ecosistemas en términos de estructura, función y composición.²⁷ Sin embargo, algunos autores señalan que la restauración debe estar enfocada a devolver el ecosistema a un estado en el cual se hayan recuperado la mayor parte de los componentes, procesos y atributos que lo hacen autosustentable; es decir “que el ecosistema bajo las condiciones actuales sea capaz de tomar una trayectoria ecológicamente autónoma continuada hacia el largo plazo, aunque esta no siempre pueda ser la trayectoria evolutiva original²⁸”.

²⁷ BALAGUER, Luís. Las Limitaciones de la Restauración de la Cubierta Vegetal. En: Ecosistemas. 2002. P 1-11.

²⁸ SANCHEZ, OSCAR, et al. Temas sobre Restauración Ecológica. Instituto Nacional de Ecología. México. 2005, p 21-27

c) C) Cubiertas Sintéticas: Las cubiertas sintéticas son de amplio uso en la industria minera para reducir la infiltración hacia los desechos generadores de acidez, los materiales más utilizados para este propósito son el polietileno (PE), polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno clorado (CPE), polietileno clorosulfonado, cloruro de polivinilo (PVC), polietileno linear de baja densidad (LLDPE), revestimientos de arcilla geosintéticos y geomembranas recubiertas con asfalto. Debido a que estos materiales sintéticos se ven ampliamente afectados con la luz solar en el tiempo, es necesario protegerlos con una capa de suelo²⁹.

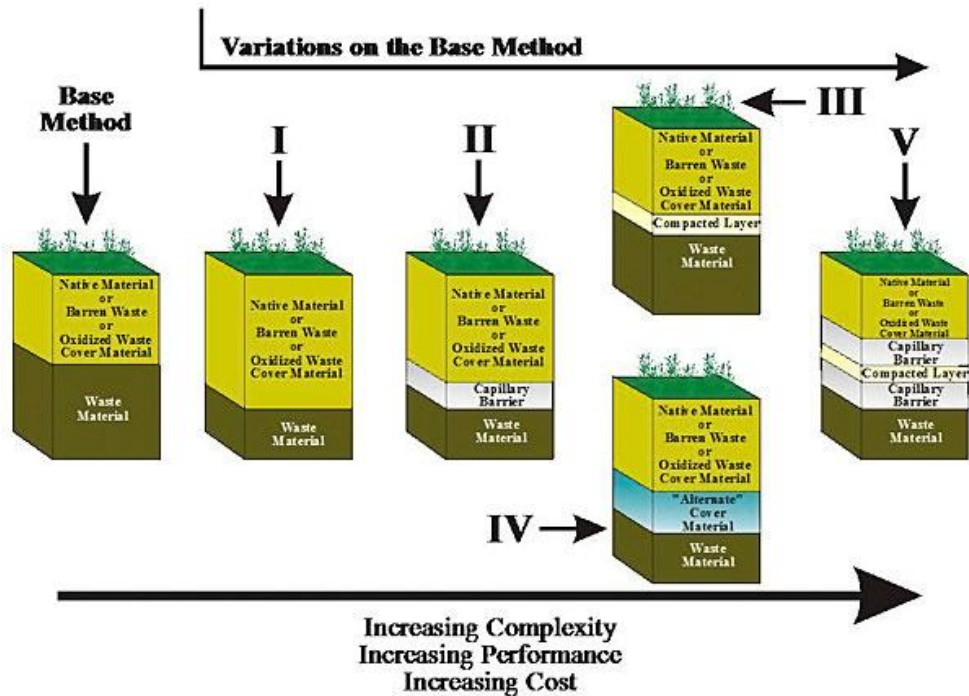
Imagen16. Factores que afectan las cubiertas con suelo en el corto y largo plazo



Fuente: International Network for Acid Prevention

²⁹ International Network for Acid Prevention. Op. cit., p. 17

Imagen 17. Diferentes configuraciones para la implementación de cubiertas con suelo.



Fuente: International Network for Acid Prevention

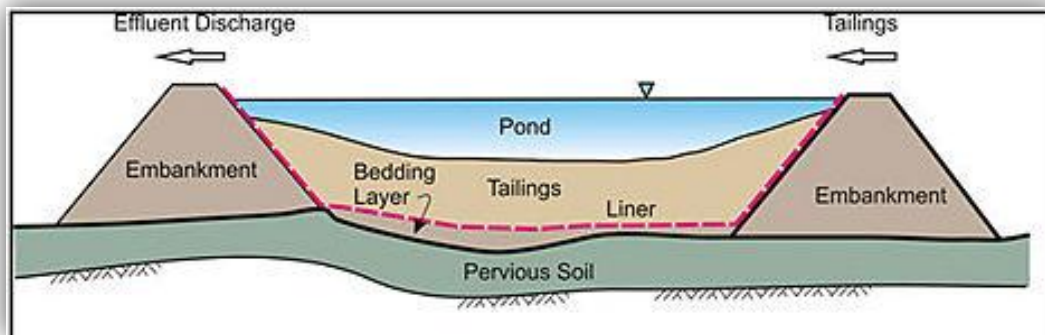
4.2.3 Cubiertas Húmedas

Los métodos que utilizan cubiertas de agua para evitar la formación de DAR, son ampliamente utilizados en la industria minera, dado que estas limitan la entrada de oxígeno mejor que las cubiertas secas, ya que el oxígeno es aproximadamente 30 veces menos soluble en agua que en el aire.

a) **Disposición Subacuática:** en esta técnica generalmente se disponen los residuos mineros bajo las cubiertas de agua, en donde la columna de esta debe ser suficiente como para prevenir la entrada oxígeno y la resuspensión del material por efectos de oleaje. Así mismo, esta técnica no se debe utilizar para el material que ya se encuentre oxidado. En la imagen 18 se observa un diseño que puede ser manejado para las cubiertas con agua. Los requerimientos generales para llevar a cabo este tipo de cubiertas son entre otros, la disponibilidad de agua

suficiente, estabilidad física a largo plazo o uso de contenedores adecuados para tal propósito con gran capacidad para soportar efectos climáticos extremos, una columna de agua que evite la resuspensión de los residuos, por ejemplo una de entre 1-3m de agua, consideraciones sobre periodos prolongados de sequía y por ende la exposición al ambiente de este material previamente inundado³⁰. Con el objetivo de comparar el comportamiento de las cubiertas secas, húmedas y el uso de materiales de enmienda como la materia orgánica, se construyó la tabla 3, donde se observan los diferentes resultados de las caracterizaciones fisicoquímicas de los lixiviados utilizando las diferentes metodologías de prevención de formación de DAM.

Imagen 18. Cubiertas con agua para residuos mineros



Fuente: International Network for Acid Prevention

b) Uso de Humedales: los humedales como cubierta de relaves, consisten en una capa de suelo, otra de vegetación, y una de agua encima del material reactivo, el suelo protege de eventos de sequía extremos, la vegetación previene fenómenos de erosión y el agua limita la entrada de oxígeno atmosférico. Los humedales permiten mantener un ambiente reductor sobre los minerales oxidables debido a que con el tiempo se presenta una disminución en el oxígeno disuelto en el agua, de esta manera se precipitan sulfuros metálicos insolubles.

³⁰ Ibid., p. 44.

En la tabla 3 se presenta el resumen de los resultados obtenidos por diferentes autores al utilizar diferentes tipos de cubiertas, en las caracterizaciones fisicoquímicas de los lixiviados.

Tabla 3. Comparación de caracterizaciones fisicoquímicas utilizando diferentes tipos de cubierta

Técnica Utilizada	pH	Concentración de metales mg/L	OD	Mn mg/L	As mg/L	SO ₄ mg/L
Uso de enmienda orgánica ³¹	8	<LD	<2	1-15	15-40	2000-2500
Cubierta ³² seca	10,6	<0.04	NR	0.03	0.57	NR
Cubierta ³³ húmeda	8-8.5	0.004-0.1	10>	0-0.005	NR	1-2

De la tabla 3 se puede analizar que en general todas las cubiertas permitieron mantener un pH superior al neutro, evidenciándose que todas las metodologías son efectivas para la formación de eventos de acidificación. Así mismo excepto para el Mn y el As las concentraciones de metales pesados se mantuvieron por debajo de los límites permisibles para descarga a fuentes hídricas, aunque para las cubiertas húmedas se registró un valor de 0,1mg/L que corresponde exactamente al Cu el cual se encuentra en el límite permitido. Para el caso del Mn se registran valores entre 1-15mg/L con el uso de la enmienda orgánica debido al contenido superior de Mn en el material reactivo, a que la solubilidad del metal decrece al pasar de valores de pH 8 a 10, posiblemente a que las condiciones anóxicas sean mayores con la barrera seca lo cual favorece la precipitación del Mn; para la cubierta húmeda se debe a la altura a la que fue tomada la muestra ya que los metales se precipitan y se ubican en los sedimentos, si la altura de esta es lo suficientemente alta como para evitar su redispersión. Para el caso del As,

³¹ PEPPAS, A et al. Use of Organic Covers for Acid Mine Drainage Control. En: Minerals Engineering. Junio 2000. Vol 13, p 563-574.

³² SUNG AHN, Joo et al. An engineered cover system for mine tailings using a hardpan layer: A solidification/stabilization method for layer and field performance evaluation. En: Journal of Hazardous Materials. Septiembre 2011. Vol 197, p 153-160.

³³ VIGNEAULT, Bernad et al. Geochemical Changes in Sulfidic Mine Tailings Stored Under a Shallow Water Cover. En: Elsevier. Junio 2000. Vol 35, p 1066-1076.

sucede un efecto similar que con el Mn, el arsénico se encuentra como As^{+5} a valores de pH entre 5 y 9 y a valores más elevados disminuye su solubilidad, precipitándose como As^{+3} en condiciones de anoxia. Los iones sulfato que se evidencian con el uso de enmienda orgánica se deben a los altos contenidos de los lodos anaerobios ya que provienen del tratamiento aguas residuales domésticas, para el caso de la cubierta húmeda los sulfatos se encuentran ubicados en los sedimentos y no en la parte superficial de la cubierta húmeda.

4.3 TRATAMIENTO DE DRENAJES DE MINA

Debido a la falta de conocimiento y reglamentación frente a la problemática de los drenajes de mina, en la actualidad existen en todo el mundo centenares de trabajos mineros ya clausurados con problemas de DAR o DAM, los cuales llevan décadas de haberse formado y de estar contaminado fuentes de agua superficiales y subterráneas. Por esta razón se hace necesario llevar a cabo un tratamiento adecuado de los drenajes una vez generados según sean sus requerimientos, por ende es lo mismo tratar un drenaje ácido de mina que requiere ajustes de pH, precipitación de metales pesados y control de cloruros y sulfatos, que un drenaje neutro que por lo general solo requiere control de aniones. Así las cosas, antes de proceder a ejecutar un tratamiento para los drenajes de mina, es necesario evaluar condiciones como: el influente, sistemas de tratamiento disponibles para ese tipo de agua, características deseadas para el efluente, subproductos del tratamiento, y condiciones sitio específicas, como clima, topografía, entre otras. En general los tipos de tratamientos para las diferentes clases de drenajes de mina (ácido, neutro y salino) se agrupan en dos grupos: los métodos pasivos y los activos.

4.3.1 Métodos Activos de Tratamiento

Los métodos de tratamiento activo, hacen referencia a aquellos que necesitan continuamente de la intervención humana y de electricidad para su correcta

operación, tal es el caso de aquellos que necesitan adición permanente de químicos, monitoreo, limpieza de las estructuras de conducción y almacenamiento. En General un drenaje ácido con altos contenidos de hierro requiere una etapa de aireación para favorecer la oxidación del Fe (II), una etapa de neutralización para aumentar el pH del agua, la precipitación de los metales disueltos en ella y la remoción de iones como cloruros y sulfatos que estén en concentraciones tóxicas para los organismos acuáticos. A continuación se describen algunos de los procesos utilizados para el tratamiento de DAM³⁴.

4.3.1.1 Aireación: la técnica de aireación generalmente se utiliza como un paso dentro de los sistemas de tratamiento de los drenajes, este permite la oxidación del hierro ferroso disuelto en el agua que es uno de los componentes principales de los drenajes de mina, normalmente el máximo valor de oxígeno disuelto en el agua se encuentra alrededor de los 10mg/l y esto no es suficiente para oxidar aguas que pueden contener más de 50mg/l de Fe(II) Los métodos de aireación más utilizados pueden variar desde la adecuación de estructuras que aprovechan la gravedad en algunos sitios, hasta el uso de aireadores mecánicos y agitadores que permiten simultáneamente un proceso de aireación y mezcla de reactivos. En la imagen 19 se aprecia el método de aireación utilizado para los drenajes de mina.

4.3.1.2 Neutralización: Los métodos de neutralización son los más ampliamente utilizados en las minas donde se han generado drenajes ácidos, ya que estos permiten la corrección del pH a valores de descarga adecuados, a la vez que precipitan la gran mayoría de los metales disueltos en el agua como cobre, hierro, aluminio, plomo, arsénico, entre otros. Los reactivos preferidos para llevar a cabo la neutralización de efluentes son compuestos básicos como el carbonato de calcio, la cal hidratada, el óxido de calcio, el hidróxido de sodio,

³⁴ International Network for Acid Prevention. Op. cit., p. 17

óxido de magnesio, entre otros³⁵. En la tabla 4 se muestran las diferentes características de los distintos materiales utilizados para la neutralización de DAM, así mismo en la imagen 20 se muestran un esquema general de neutralización de DAM con cal.

Imagen 19. Aireación del DAM por gravedad



Fuente: International Network for Acid Prevention

Tabla 4. Características de los agentes neutralizantes más comúnmente utilizados para el tratamiento de DAM.

Agente Neutralizante	Cantidad requerida (ton agente neutralizante/ton acidez)	Eficiencia de neutralización (% de agente neutralizante utilizado)	Costo relativo (dólar americano/saco de un ton)
Carbonato de calcio (CaCO ₃)	1	30-50	10-15
Cal hidratada Ca(OH) ₂	0,74	90	60-100
Oxido de Calcio CaO	0,56	90	80-240
Carbonato de Sodio Na ₂ CO ₃	1,06	60-80	200-350
Hidróxido de sodio NaOH	0,80	100	650-900
Óxido de Magnesio MgO	0.4	90	No reportado

Fuente: International Network for Acid Prevention

³⁵ Ibid., p. 49.

En la tabla 5, se identifican algunas de las ventajas y desventajas de los principales reactivos utilizados para la neutralización de drenajes de mina y precipitación de metales pesados. En la imagen 21, se observan los valores de solubilidad para diferentes hidróxidos metálicos, estos se deben tener en cuenta de acuerdo al tipo de metal que se quiera precipitar ya que algunos como el Mn requieren valores de pH altos, y otros se pueden redisolverse a estos valores.

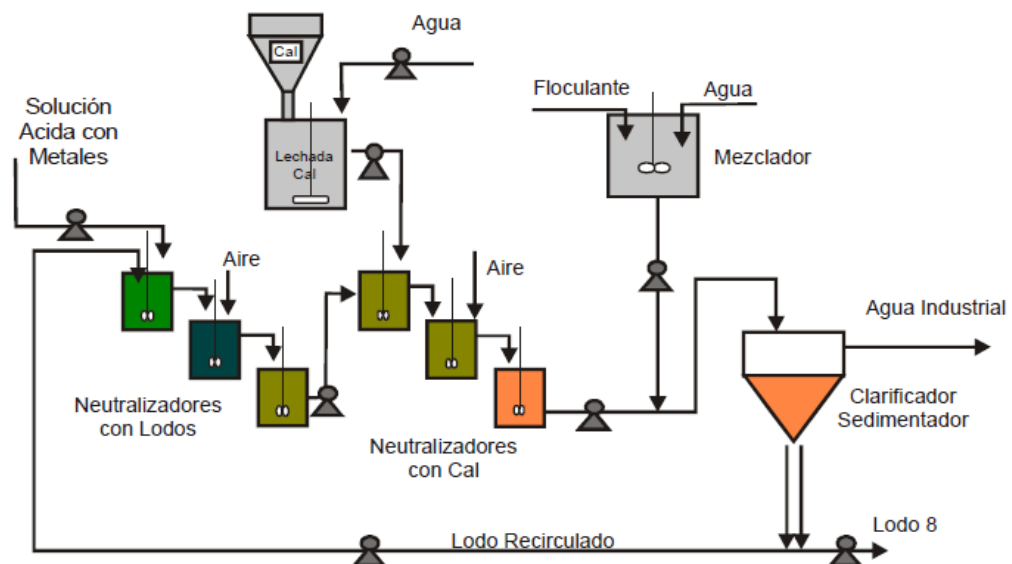
Tabla 5. Comparación entre diferentes agentes neutralizantes y precipitantes utilizados en el Tratamiento de Drenajes de Mina.

Agente Neutralizante y/o Precipitante	Ventajas	Desventajas
a) Carbonato de Calcio	<ul style="list-style-type: none"> *Bajo costo *Eficiente en la remoción de Fe y Al. *Favorece la precipitación parcial de sulfatos. Permite la neutralización del agua. 	<ul style="list-style-type: none"> *Poco eficiente para la remoción de cadmio, arsénico y cobre. *Baja solubilidad en agua. *Soluciones deben mantenerse constantemente agitadas. *Forma costras que obstruyen las tuberías. *requiere de la adición de un agente floculante debido a que los carbonatos formados son muy finos y de difícil sedimentación.
b) Soda Cáustica	<ul style="list-style-type: none"> *Alta solubilidad en agua y no requiere agitación constante de sus soluciones. *Permite la neutralización del drenaje. *mayor eficiencia en la remoción de metales pesados. *capaz de remover metales como arsénico, cobre, aluminio, hierro, entre otros. *no forma tantas costras como la cal hidratada y el carbonato de calcio. 	<ul style="list-style-type: none"> * reactivo más costoso que la cal y el carbonato. * La preparación de sus soluciones es de especial cuidado pues son altamente exotérmicas. Su punto de congelación es de 14°C y puede solidificarse en climas fríos. *Requiere de la adición de un agente coagulante ya que los hidróxidos formados son muy finos y de difícil sedimentación.
c) Cal Hidratada	<ul style="list-style-type: none"> *Bajo Costo *Fácil manejo de sus soluciones. *Permite altas remociones de Fe. *Puede ser aplicado en forma sólida o líquida según la conveniencia del 	<ul style="list-style-type: none"> *Menos eficiente en el proceso de neutralización y remoción de metales comparado con otros reactivos como el NaOH.

	<p>proceso.</p> <ul style="list-style-type: none"> *Permite la neutralización de soluciones ácidas. *Favorece la remoción parcial de sulfatos. 	<ul style="list-style-type: none"> *Requiere de la adición de un agente coagulante ya que los hidróxidos formados son muy finos y de difícil sedimentación.
d) Sulfuros Metálicos	<ul style="list-style-type: none"> *el uso de sulfuros como sulfuro de sodio (Na_2S), sulfuro de hierro (FeS), sulfuro de calcio (CaS) e hidrosulfito de sodio (NaHS), permiten la precipitación de metales generando compuestos de muy baja solubilidad a valores de pH neutros. *Permite la remoción de casi cualquier metal pesado presente en el drenaje. * Coste de reactivos relativamente bajos. 	<ul style="list-style-type: none"> *Requiere ser usado a valores de pH cercanos a la neutralidad.

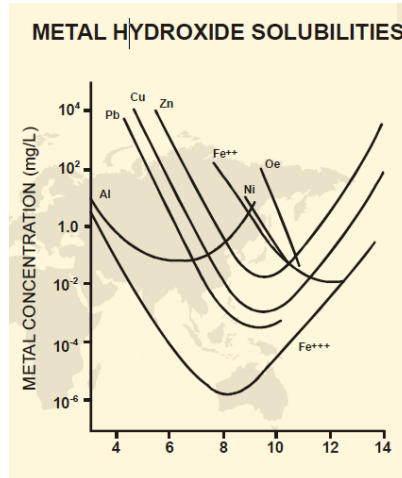
Fuente: International Network for Acid Prevention

Imagen 20. Neutralización y precipitación de un drenaje ácido de mina



Fuente: GESTIÓN EN CIERRE DE MINAS. Perú. Cámara Minera del Perú

Imagen 21. Solubilidad de hidróxidos metálicos.



Fuente: GESTIÓN EN CIERRE DE MINAS. Perú. Cámara Minera del Perú

Una vez realizado el proceso de neutralización de los drenajes, es necesario implementar técnicas adicionales para la remoción de cloruros y sulfatos ya que los carbonatos e hidróxidos no remueven efectivamente estos iones, en la tabla 6 se enuncian las técnicas de remoción de sulfatos más frecuentes en la industria minera³⁶.

Tabla 6. Comparación entre las técnicas de tratamiento utilizadas para remoción de sulfatos.

Método de Remoción de Sulfatos	Descripción	Ventaja
Con agentes químicos	a) Se utilizan reactivos como hidróxido de aluminio a valores de pH elevados en donde se lleva a cabo la precipitación de la etringita $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{OH}_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$, un aluminio sulfato de cal hidratado.	*Reactivo utilizado es muy económico y fácil de conseguir. *No requiere de equipos sofisticados para su implementación. *Reactivo es de fácil uso.
Uso de Membranas	el tratamiento requiere de unas etapas previas a la desalinización por membranas,	*Mayor eficiencia en la remoción de sulfatos que los procesos químicos y

³⁶ Ibid., p. 50.

	<p>para evitar que estas se saturen muy rápidamente, las etapas de tratamiento con membranas son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • *Adición de cal y posterior remoción del yeso formado. • *Pretratamiento para la remoción de sólidos suspendidos. <p>*Uso de membranas de nanofiltración u osmosis inversa.</p>	biológicos.
Proceso de Intercambio Iónico	<p>las resinas de intercambio iónico se usan en efluentes mineros principalmente para remover sulfatos presentes en elevadas concentraciones, las resinas están hechas principalmente de iones como OH⁻ que se intercambian por iones SO₄²⁻, mediante la siguiente reacción:</p> $2R-OH + SO_4^{2-} \rightarrow R_2SO_4 + 2OH^-$ <p>Ecuación (10)</p>	*Mayor eficiencia que los sistemas con reactivos químicos y los biológicos.
Reducción Biológica de Sulfatos	<p>Tiene como principio la reducción de iones sulfato a sulfuro. El tratamiento requiere una etapa inicial de neutralización y remoción de metales del efluente, seguidamente se agrega un donador de electrones como por ejemplo un alcohol, azúcares H₂, o agua residual doméstica, posteriormente se agregan los nutrientes esenciales para los microorganismos como nitrógeno, fosfato, potasio, y minerales traza, finalmente ocurre la reducción de los sulfatos a sulfuros llevada a cabo por las bacterias sulfato reductoras en un reactor anaerobio en donde también se desarrollan otro tipo de bacterias como las acidófilas y metanogénicas.</p>	<p>*No requiere de reactivos costosos para el proceso. *Como es un proceso biológico es menos costoso que los procesos químicos y de resinas y membranas. *proceso estable y de fácil operación.</p>

Fuente: International Network for Acid Prevention

En la imagen 22, se observa el proceso de reducción biológica de sulfatos a sulfuros, La precipitación de sulfuros metálicos y reducción biológica de sulfatos ocurre mediante la siguiente reacción:

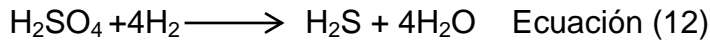
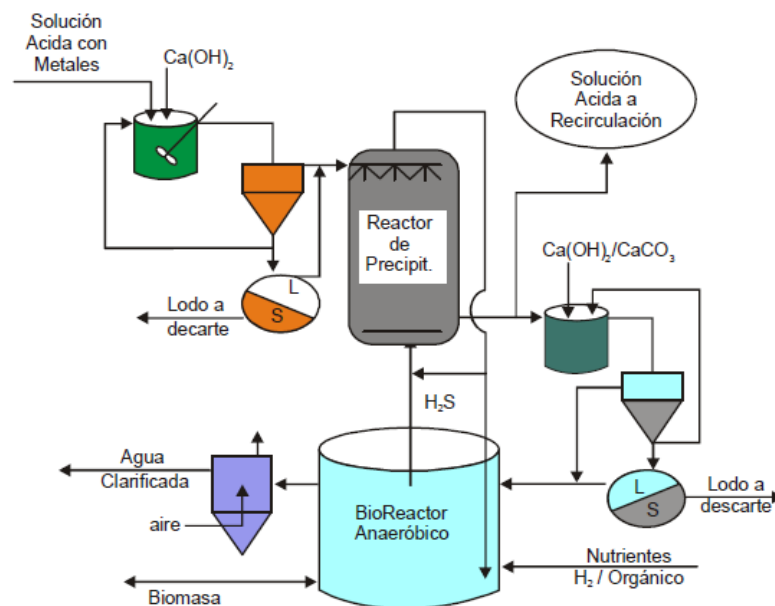


Imagen 22. Remoción de Sulfatos por vía Biológica.



Fuente: GESTIÓN EN CIERRE DE MINAS. Perú. Cámara Minera del Perú

Adicionalmente a las consideraciones del tratamiento del agua, se debe tener en cuenta que la mayoría de los procesos activos generan subproductos cuya disposición final puede ser de difícil manejo, por ende en la presente sección se

abordará de manera general el uso que se puede dar al lodo proveniente del tratamiento de un DAM como principal subproducto de neutralización.

4.3.2 Tratamiento y Disposición de Subproductos de Tratamiento.

*Manejo de Lodos como principal subproducto de los procesos de tratamiento de DAM: las principales consideraciones que se deben tener en cuenta para el manejo de los lodos son las cantidades producidas, los procesos de deshidratación, el contenido de humedad, su densidad, composición y estabilidad fisicoquímica, espacios para su disposición, entre otras, en la imagen 23 se observan los lodos provenientes del proceso de tratamiento de un drenaje ácido. En la tabla 7, se enuncian las principales alternativas de disposición de los lodos generados en el tratamiento de un drenaje de mina³⁷.

Imagen 23. Manejo de Lodos provenientes del Tratamiento de DAM



Fuente: El autor

³⁷ PRICE A. Op. cit., p. 17.

Tabla7. Alternativas de Disposición de Lodos Provenientes del Tratamiento de un DAM²

Alternativas de Disposición	Descripción	Ventajas
Piscinas de Disposición	Los lodos previamente deshidratados (con un contenido de humedad de entre 40 a 50%), son bombeados directamente a una piscina de disposición en donde se genera una separación física del agua y los sólidos.	a) Debido a que los lodos contienen un exceso de alcalinidad suficiente como para evitar la acidificación de las aguas y la disponibilidad de los metales pesados, Las piscinas pueden permanecer durante años sin afectar los ecosistemas.
Codisposición con Relaves	Esta práctica se basa en la mezcla de lodo proveniente del tratamiento de drenajes de mina, con los relaves obtenidos en el proceso de beneficio de los minerales, generalmente la proporción de lodos – relaves no supera la relación 1:20.	*esta mezcla sirve para prevenir la oxidación de sulfuros generadores de acidez en los relaves. * El exceso de alcalinidad que contienen los lodos DAM, puede neutralizar cualquier fuente de acidez que se genere en los relaves.
Codisposición con Estériles de Mina	Esta técnica se basa en la mezcla de lodo proveniente del tratamiento de drenajes de mina, con los estériles obtenidos en el proceso de extracción del mineral.	*permite aprovechar el exceso de alcalinidad de los lodos para neutralizar cualquier proceso de acidificación que se pueda generar en los estériles. * El lodo rellena espacios vacíos entre los estériles que minimizan el contacto del oxígeno atmosférico con los sulfuros reactivos presentes en estos.
Retrolenado de Trabajos Subterráneos con Lodos de Tratamiento	Consiste en realizar un relleno de los trabajos subterráneos clausurados para dar estabilidad a los mismos.	*Se disminuye la necesidad de espacio para la disposición de los lodos * minimiza las posibilidades de contaminación de agua b) * El exceso de alcalinidad presente puede contribuir con la neutralización del exceso de acidez de una mina.
Disposición en Tajos a Cielo Abierto	Consiste en realizar un relleno de los tajos en los que ya se se han finalizado las labores de extracción, esto se realiza cuando la mina está a una distancia razonable del sitio de	*Evitan la acidificación de los lagos que puedan formarse en el interior de los tajos. *permite la minimización de la contaminación de las aguas subterráneas.

	tratamiento del drenaje de mina.	
Recuperación de productos de Interés Económico:	<p>c) la recuperación de materiales de interés de los lodos del tratamiento de DAM, es una actividad relativamente reciente que cada vez toma más fuerza y que es ampliamente investigada, entre los materiales con potencial económico que se pueden recuperar de los lodos se encuentran:</p> <ul style="list-style-type: none"> *Metales *Suplementos que pueden ser utilizados como enmienda tales como el $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ *CaCO_3 *Materiales útiles para la construcción como el yeso *Recuperación de sulfuros y sales de magnesio. *Pigmentos (ferrihidrita) 	<p>*Permite obtener oportunidades económicas de un pasivo ambiental.</p> <p>*Debido a que se pueden obtener oportunidades económicas de estos subproductos, se minimizan las posibilidades de contaminación de las fuentes hídricas superficiales.</p> <p>* Pueden incluso ser útiles para evitar nuevas explotaciones mineras por ejemplo de óxido de hierro o de algunos metales como el cobre.</p>

Fuente: International Network for Acid Prevention

Una vez conocidos algunos de los métodos activos para el tratamiento de drenajes de mina, se debe considerar que todos los trabajos de explotación de minerales tienen un ciclo de vida finito y que eventualmente llegan a su fase de desmonte, cierre y abandono. Por esta razón se hace necesario buscar alternativas diferentes a los métodos anteriormente descritos, ya que no siempre se contará con los recursos económicos y el personal para mantener la operación de los sistemas de tratamiento, por ende se han desarrollado métodos de tratamiento pasivos que requieren un mínimo de mantenimiento, supervisión y uso de recursos químicos y de electricidad, estos se describen en la siguiente sección.

4.3.3 Métodos de Tratamiento Pasivos

Los sistemas de tratamiento pasivos, son aquellos que requieren un mínimo de intervención humana para su funcionamiento y mantenimiento, generalmente requieren de grandes áreas pero su consumo de energía y reactivos químicos es menor, también requieren de materiales como suelo, arcillas, roca molida,

materiales de enmienda, vegetación, entre otros. Adicionalmente los sistemas de tratamiento pasivos deben permanecer durante largos periodos de tiempo³⁸.

En la tabla 8 se mencionan diferentes procesos de tratamiento pasivo desarrollados hasta el momento, dependiendo de las características del drenaje.

Tabla 8. Clases de sistemas de tratamiento pasivos según las características del drenaje de mina

Tipo de Tratamiento Pasivo	Aplicación en Drenajes de Mina
Humedales Aerobios	Drenajes neutros o ligeramente alcalinos
Canales de caliza anóxicos	Drenajes ácidos con bajas concentraciones de Fe ⁺³ y Al ⁺³ y O ₂ disuelto.
Humedales Anaerobios	Drenajes ácidos con elevadas concentraciones de metales.
Sistemas reductores y productores de alcalinidad	Drenajes ácidos con elevadas concentraciones de metales.
Canales de caliza abiertos	Drenajes ácidos con elevadas concentraciones de metales y moderadas a bajas concentraciones de sulfatos.

Fuente: International Network for Acid Prevention

Las técnicas de tratamiento pasivo de drenajes de mina están diseñadas normalmente para tratar caudales de aproximadamente 1m³/día, sin embargo se han desarrollado sistemas con capacidad de hasta 6500m³/día. En general, los principales mecanismos utilizados para el tratamiento de drenajes de mina a través de sistemas pasivos consisten en:

- Oxidación
- Precipitación de metales como hidróxidos y carbonatos bajo condiciones aerobias
- Precipitación de metales como sulfuros.
- Acomplejamiento y adsorción en materia orgánica.
- Intercambio iónico con el uso de materia orgánica.
- Fitorremediación.

³⁸ Gestión en Cierre de Minas. Op. cit., p 18.

Humedales

Los humedales son conocidos como filtros biológicos y han surgido como una amplia alternativa de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, estos emplean diferentes mecanismos para llevar a cabo la reducción de contaminantes de las aguas, como la asimilación de nutrientes por parte de las plantas, degradación microbiológica, oxidación y reducción de componentes, sedimentación, adsorción de partículas, entre otros. Para los drenajes de mina, la remoción de metales pesados mediante el uso de humedales se lleva a cabo a través de sus 3 compartimientos generales, el suelo y los sedimentos, el agua y las plantas, el proceso de remoción de metales de un drenaje de mina es muy complejo y no puede ser explicado mediante un único mecanismo, es necesario abordar como mínimo tres tópicos para su comprensión; la remoción física, química y biológica³⁹.

4.3.3.1.1 Proceso Físico: la remoción de metales mediante el proceso físico se logra mediante la sedimentación del material particulado presente en los drenajes ácidos, debido a que por lo general el agua se mueve lentamente en los humedales y las partículas más densas se sedimentarán. Para las partículas que son livianas o menos densas que el agua la sedimentación se facilita con valores de pH elevados, elevadas concentraciones de sólidos suspendidos, cambios en la fuerza iónica y la presencia de algas.

4.3.3.1.2 Proceso Químico: los procesos químicos por los cuales se remueven los metales pesados presentes en los drenajes de mina a través de los humedales son muy variados y se explican algunos a continuación.

a) Oxidación e hidrólisis de los metales pesados: algunos metales como el hierro, manganeso, aluminio, entre otros pueden formar compuestos insolubles cuando

³⁹ SHEORAN, A.S; SHEORAN, V. Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. En: Journal of Minerals Engineering. 2005. vol 19, p 105-116.

sufren procesos de oxidación e hidrólisis, por ejemplo el hierro puede ser removido a valores de pH superiores a 3,5 en el estado férrico. El aluminio también requiere de incrementos de pH hasta valores cercanos a 5 para ser removido del agua, por otro lado la remoción de Mn es una de las más complicadas, debido a que esta ocurre a valores de pH superiores a 8 y es difícil llevar un drenaje de mina hasta este punto dentro de los humedales.

- b) **Formación de Carbonatos:** los metales pesados también pueden formar carbonatos cuando las concentraciones de bicarbonato presentes en el agua son elevadas, la formación de estos puede generarse debido a la presencia de bacterias en los sedimentos que generan una alcalinidad carbonácea relativamente alta, o debido a la lixiviación de estos de la roca que entra en contacto con el drenaje de mina; la precipitación de carbonatos es muy efectiva para la remoción de plomo y níquel.

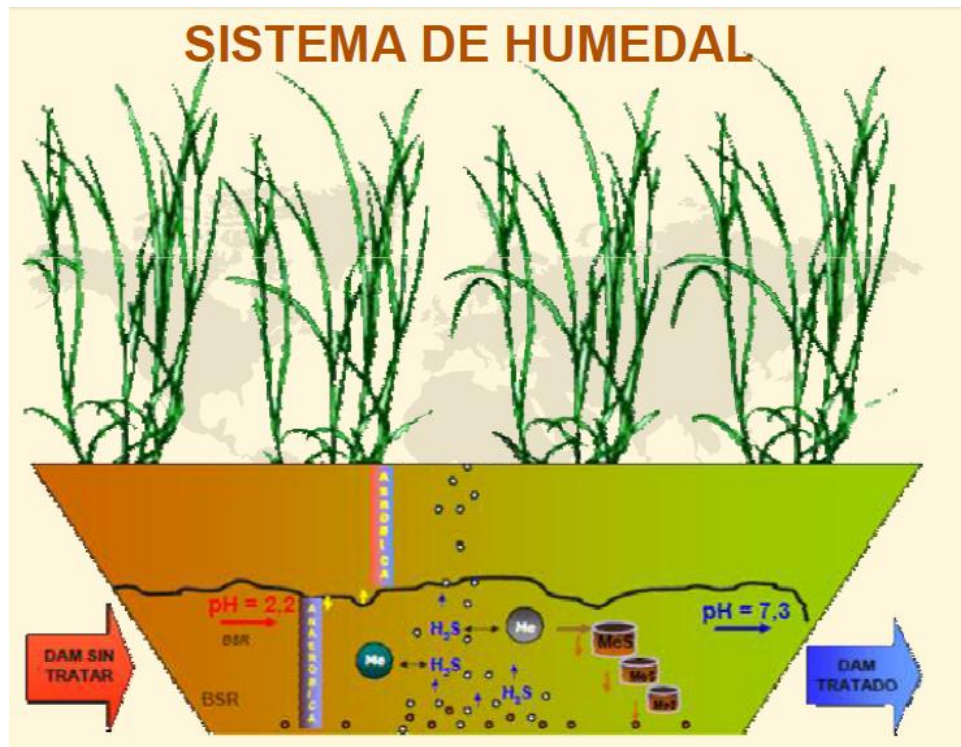
- c) **Formación de Sulfuros Metálicos:** en los humedales se promueve la formación de bacterias sulfato reductoras, que en condiciones anaerobias, presencia de materia orgánica y sulfatos, generan sulfuro de hidrogeno que reacciona con gran parte de los metales presentes en el agua de drenaje, y genera la formación de sulfuros metálicos insolubles.

4.3.3.1.3 Proceso de Remoción Biológica: el proceso de remoción biológica de metales pesados de los drenajes de mina, es quizá el más importante entre los que se desarrollan en los humedales; uno de los más reconocidos es el tratamiento con plantas como las emergentes, sumergidas, flotantes, macrófitas, entre otras⁴⁰. Por otro lado, los microorganismos presentes en los humedales juegan un papel muy importante en la remediación de los drenajes de mina, debido a que los metales son inmovilizados gracias a los procesos reductores catalizados por estos, las bacterias sulfato-reductoras representan uno de los

⁴⁰ Ibid., p 60.

grupos más importantes en los procesos de inmovilización de metales pesados. En la imagen 24 se muestra el esquema general de un humedal para el tratamiento de Drenajes de mina.

Imagen 24. Humedal para el Tratamiento de Drenajes de Mina



Fuente: GESTIÓN EN CIERRE DE MINAS. Perú. Cámara Minera del Perú

Adicionalmente a los humedales como la principal alternativa de tratamiento de drenajes ácidos o neutros de mina, se cuenta con otras técnicas como los canales anóxicos de caliza, las barreras reactivas permeables y los canales abiertos de caliza, que se describen en la tabla 9.

Tabla 9. Descripción de Sistemas de Tratamiento Pasivos Para Drenajes de Mina.

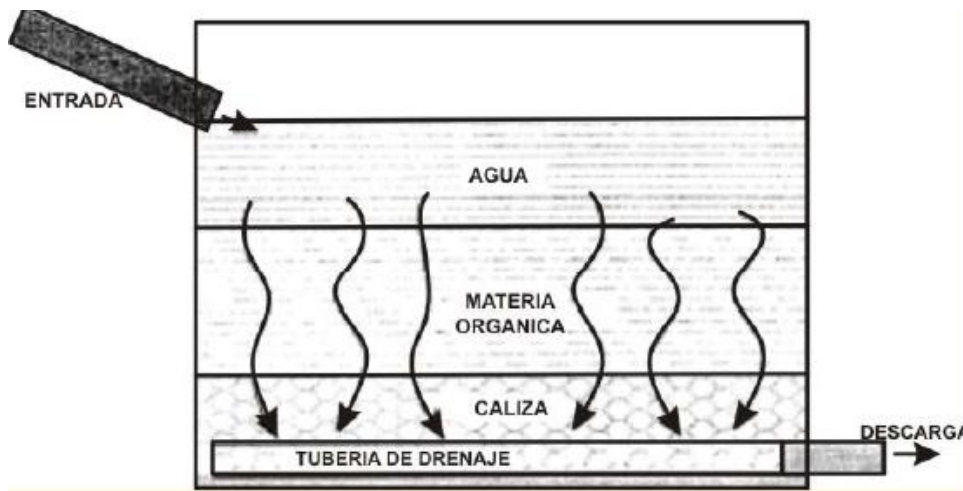
Sistema de Tratamiento Pasivo	Descripción	Requerimientos
<p>2 2.3.3.2 Canales de Caliza Anóxicos</p>	<p>Generalmente son celdas enterradas en las cuales se evita el ingreso de oxígeno atmosférico, y la acumulación de CO₂ se maximiza. La caliza presente en el canal, se disuelve en el drenaje ácido, eleva el pH y le adiciona alcalinidad al agua, la caliza no se recubre con precipitados de hierro debido a que el Fe²⁺ no se precipita como Fe(OH)₂⁴¹.</p>	<p>*Uso de caliza con un contenido de CaCO₃ superior al 85% y un tamaño de 5 – 20cm * Deben permanecer inundados con el agua de drenaje. *Al final del canal se debe construir un sumidero que esté en contacto con el oxígeno atmosférico para favorecer la precipitación del hierro. *Se requieren aproximadamente 2800kg de piedra caliza del 90% de pureza por cada L/min de agua de drenaje². * se debe tener en cuenta una entrada de oxígeno inferior a 1mg/l y concentraciones bajas de Fe y Al.</p>
<p>3 2.3.3.3 Barreras Reactivas Permeables</p>	<p>Este sistema fue diseñado para los casos en los que el agua tiene altas concentraciones de oxígeno disuelto, hierro férrico y otros metales, su función consiste en reducir el Fe³⁺ a Fe²⁺ en una capa orgánica y posteriormente neutralizar la acidez en una capa de caliza instalada debajo de la orgánica, así mismo, también ocurre la reducción de sulfatos en la que también se genera alcalinidad y se precipitan metales. En la imagen 25 se muestra el esquema general de un sistema de Barreras Reactivas permeables.</p>	<p>*El sistema debe contener un sedimentador para favorecer precipitación de hidróxidos y sólidos sedimentables. *Debe tener una capa de caliza de un tamaño aproximado entre 0,6 - 1,2m medidos desde el fondo del área excavada. *Debe contar con una capa de materia orgánica previamente compostada de entre 0,15-0,6m de altura medidos desde la capa de caliza, que sirve como medio de nutrientes para las bacterias sulfato reductoras. *Debe tener una capa de agua de entre 1-3m de agua que ayuda a que el agua de drenaje fluya hacia la capa de materia orgánica.</p>

⁴¹ ROBBINS, E.I., et al. Hydrobiogeochemical interactions in 'anoxic' limestone drains for neutralization of acidic mine drainage. En: FUEL. Vol 78. 1999, p 259- 270.

<p>4 2.3.3.4 Canales Abiertos de Caliza</p>	<p>fueron diseñados para introducir alcalinidad al drenaje, exponiendo piedra caliza al contacto directo con el DAM, el principal problema de este sistema de tratamiento es la formación de costras de hierro que recubren la piedra caliza y así esta comienza perder su efectividad</p>	<p>*Bajas concentraciones de Fe para evitar formación de costras que recubran la piedra caliza. *Velocidades de flujo elevadas para evitar la formación de costras. *realizar mantenimiento cuando se observen las rocas de caliza saturadas.</p>
--	--	---

Fuente: ROBBIS, et al.

Imagen 25. Esquema de Barreras Reactivas Permeables.



Fuente: GESTIÓN EN CIERRE DE MINAS. Perú. Cámara Minera del Perú

En general para obtener un adecuado desempeño de los sistemas de tratamiento pasivos, se deben definir muy bien los criterios de diseño de acuerdo al terreno, las condiciones meteorológicas de la zona, consideraciones sociales y ambientales, caracterizaciones fisicoquímicas y microbiológicas del drenaje a tratar, disponibilidad de los materiales a utilizar, entre otras.

El uso de un método pasivo o activo, depende fundamentalmente del objetivo que se quiera cumplir durante la vida útil de la mina y después de su cierre, en general

los métodos activos son más eficientes en la remoción de metales pesados y mejoramiento de la acidez y el pH, así mismo requieren de menores cantidades de área; sin embargo los métodos pasivos permiten la prolongación de su funcionamiento incluso después de la finalización de los trabajos mineros sin la inversión de grandes cantidades de dinero, por otra parte estos requieren de áreas muy extensas, especialmente cuando los caudales de drenaje son muy altos, adicionalmente tienen requerimientos especiales del agua que se ha de tratar debido a los factores físicos, químicos y especialmente biológicos que limitan su desempeño.

Una vez abordados los principales métodos activos y pasivos para la neutralización de drenajes ácidos y remoción de metales pesados y sulfatos, se muestra en la tabla 10 los resultados obtenidos por diferentes autores para el tratamiento de DAMs mediante la neutralización con piedra caliza, el uso de humedales y la combinación de métodos activos y pasivos.

Tabla10. Comparación entre diferentes métodos de tratamiento de DAM.

Parámetros fisicoquímicos	Humedales ⁴²		Tratamiento activo con Caliza ⁴³		Combinación de tratamiento activo/pasivo ⁴⁴	
	Influyente	Efluente	influyente	Efluente	Influyente	Efluente
pH	3.9	6.3	5	6.89	2.4	6.0
Acidez mg/L	126.7	8.9	315	30	NR	NR
Alcalinidad mg/L	0	51.3	12	115	0	190
Al mg/L	8.4	0.2	33	1.9	90	6
Fe+2 mg/L	10.8	9.3	NR	NR	NR	NR
Fe total mg/L	11.3	9.4	70.9	5.9	100	20
Mn mg/L	8.2	8.2	7.4	4.4	<100	>LD
Ca mg/L	82.7	116.8	173.8	218.4	221	608
SO4	NR	NR	1074	670.2	NR	NR

⁴² WATTEN, Barnaby et al. Acid Neutralization Within Limestone Sand Reactors Receiving Coal Mine Drainage. *En: Environmental Pollution*. Junio, 2005. Vol 137, p 295-304.

⁴³ MATTHIES, Romy et al. Performanse of a Pasive Treatment System for Net Acidic Coal Mine Drainage over Five Years of Operation. *En: Science of the Total Environment*. Julio 2010. Vol 408, p 4877-4885.

⁴⁴ MACIAS, Francisco et al. From highly polluted Zn-rich acid mine drainage to non-metallic waters: Implementation of a multi-step alkaline passive treatment system to remediate metal pollution. *En: En: Science of the Total Environment*. Julio 2012. Vol 433, p 323-330.

- De la tabla 10, se puede concluir que para todos los drenajes tratados, el ajuste de pH se pudo lograr efectivamente mediante la aplicación de métodos activos y pasivos y la combinación de los mismos. Relacionado al aumento de pH, también se observó que la acidez removida para los dos casos que reportaron datos superó el 90%, neutralizando el ácido sulfúrico principal causante de la acidez en los DAM.
- Con la consecuente remoción de acidez, se observa la remoción de más del 90% de Al para los tres casos reportados, y más del 80% para el hierro total en el tratamiento activo y combinado, sin embargo para el método pasivo se observó una remoción del 16% para Fe total, posiblemente debido a que la concentración en el influente es muy baja en comparación con los otros drenajes analizados y los procesos de precipitación de carbonatos se hacen más difíciles. Sin embargo un efluente para descarga con esta concentración de Fe aún no se encuentra entre los límites aceptables y debe realizarse un proceso adicional para dar cumplimiento con la normatividad ambiental.
- El bajo % de remoción de Mn para el humedal y tratamiento con caliza se debe posiblemente a que a valores de pH neutros este aún es altamente soluble en el agua y deben elevarse los valores de pH por encima de 8,5 para comenzar su proceso de precipitación, la diferencia con el método combinado radica en que este utiliza al final del proceso materia orgánica para la reducción de sulfatos y los sulfuros generados precipitan el manganeso.
- Aunque dos de las metodologías reportadas no registran valores para la remoción de sulfatos, en los datos del método activo se observa que la remoción de SO_4 es muy baja y que tal como lo registra la literatura, requiere de métodos adicionales para su remoción.

Toda vez que se han estudiado los métodos de predicción, prevención y tratamiento de drenajes ácidos y neutros de mina, se debe resolver la pregunta de cómo determinar la eficacia de las actividades que se están desarrollando para cualquiera de las etapas descritas, para esto se cuenta con una serie de herramientas de monitoreo, que permiten la toma de decisiones de acuerdo a la interpretación de los resultados obtenidos. En la siguiente sección se aborda de manera general los criterios a tener en cuenta para los monitoreos de los drenajes de mina.

5. MONITOREO

El monitoreo hace referencia a una recolección rutinaria, estratégica y sistemática de datos que tienen como propósito permitir la toma de decisiones respecto a diferentes aspectos del manejo de los drenajes de mina. El plan de monitoreo comienza con la revisión de todo el plan de la mina, en el se analizan aspectos como la ubicación geográfica, magnitud de los trabajos superficiales y subterráneos, proceso de beneficio del mineral, zonas de disposición, fuentes hídricas superficiales, canales de agua subterránea, zonas de descarga de efluentes, información meteorológica, entre otros; Esta información permite reconocer los principales recursos potenciales de generación de DAM, también aquellas zonas que podrían ser impactadas, y las estrategias de prevención y mitigación necesarias para evitar la generación de DAM. En general el plan de monitoreo de una mina tiene como meta principal la protección de la salud de la población y el cuidado del medio ambiente, sin embargo existen unos objetivos específicos a través de los cuales se logra la responsabilidad socio ambiental de una empresa respecto al manejo de los drenajes de mina⁴⁵:

- Caracterización de la Línea Base del Proyecto: para lograr este objetivo, se lleva a cabo la recolección de datos físicos, químicos y biológicos, que permiten establecer las condiciones iniciales en las que se encuentra el área del proyecto para conocer su variación en el tiempo, esto permite a la empresa adquirir una responsabilidad social y ambiental desde el inicio hasta el final del proyecto e incluso después de su clausura, así mismo, permite reconocer disturbios previos a la llegada de los trabajos mineros que fueron generados por otros factores y otras personas.

⁴⁵ International Network for Acid Prevention. Op. cit., p. 17

- **Detección Temprana de formación de Drenaje de Mina:** mediante un seguimiento continuo de los sitios y minerales identificados como potenciales generadores de drenajes de mina, ya sea ácidos, neutros o salinos, se puede establecer una detección temprana de su formación y así mismo unas estrategias de control y mitigación que eviten el avance del proceso.
- **Detección de Impactos sobre el Medio Ambiente:** esta parte del monitoreo permite la detección de cambios fisicoquímicos y biológicos principalmente de los cuerpos de agua, como cambios en la turbidez, presencia de metales en los sedimentos, alteración de las poblaciones acuáticas, y también afectaciones sobre la salud humana que se abastece de los recursos naturales que pueden estar siendo impactados por los trabajos mineros.
- **Manejo Ambiental:** esta parte del monitoreo está diseñada para evaluar las estrategias de prevención, mitigación y tratamiento implementadas toda vez que se han detectado los principales recursos de formación de drenajes de mina, así mismo, permite mejorar y ampliar las estrategias de control previamente establecidas. En la tabla 11 se muestran los principales aspectos a tener en cuenta en los monitoreos de drenajes de mina.

Tabla 11. Levantamiento de Información Relevante en un Plan de Monitoreo

Tipo de Información	Datos Requeridos	Justificación
Climática	Régimen de Lluvias	Estos aspectos climáticos son necesarios especialmente para elaborar el balance hídrico del sitio donde se desarrollan los trabajos mineros, y para tener en cuenta algunos procesos de generación de DAM.
	Temperatura	
	Evaporación	
	Humedad	
	Velocidad del viento	
	Dirección del viento	
	Profundidad de la capa de nieve en los lugares con estaciones.	
Hidrológica	Flujo de cuerpos de agua superficiales	Permite establecer las condiciones de línea base y cambios en el tiempo asociados a las labores
	Determinación de la calidad de los cuerpos hídricos	

	Estudios de Sedimentos	mineras, también permite la elaboración del balance hídrico.
Hidrogeológica	Flujo de agua Subterránea	Permite establecer las condiciones de línea base y cambios en el tiempo asociados a las labores mineras, también permite la elaboración del balance hídrico.
	Determinación de la calidad del agua subterránea.	
Biológica	Receptores acuáticos	Determinación de las condiciones de Línea Base, determinación de efectos de exposición a distintos niveles de contaminantes causados por las actividades mineras, cambios sobre la flora y fauna acuática.
	Hábitat	
Geoquímica	Composición Química	Determinación del potencial de generación de drenajes ácidos de mina.
	Test ABA	
	Test cinéticos	
	Mineralogía	
Gases	Generación de gases tales como ácido sulfhídrico	Determinante en la generación de drenajes ácidos.

Fuente: International Network for Acid Prevention

Junto a todas las herramientas de monitoreo que se han venido desarrollando para la los drenajes ácidos de mina, se debe resaltar la importancia del uso de los bioindicadores para este propósito, ya que generalmente los análisis fisicoquímicos solo muestran una aproximación de las condiciones reales de un sitio impactado, pero es necesario contar con la información de los organismos allí presentes. Algunos estudios para determinación de la calidad de agua impactada con drenajes ácidos se han desarrollado haciendo uso del índice biológico BMWP (Biological Monitoring Working Party Score), en donde se ha recolectado información acerca de los macroinvertebrados presentes en cuerpos de agua superficial⁴⁶.

⁴⁶ OBERHOLSTER, P.J, et al. An ecotoxicological screening tool to prioritise acid mine drainage impacted streams for future restoration. En: Environmental Pollution. Vol 176, 2013. P 244-253.

Por otra parte se han venido adaptando algunas herramientas como el uso de algas filamentosas y diatomeas como bioindicadores de la calidad de cuerpos de agua impactados por minería. Por ejemplo Oberholster et al, llevaron a cabo un estudio sobre el río Bloubank, tributario del río Crocodile, que a su vez es un tributario del río Limpopo, que abastece una parte de la población de Joanesburgo en Sur África, con el uso de algas filamentosas y diatomeas debido a que estas son un indicador muy adecuado del sitio específico de monitoreo. En el encontraron una relación inversa entre la precipitación de hidróxidos de hierro y aluminio y la abundancia de las algas presentes, pues se logró establecer que donde predominan la formación de hidróxidos de hierro la biomasa de las algas se redujo hasta en un 50%, así mismo, se pudo establecer que las condiciones de pH bajos tampoco favorecían su crecimiento. Finalmente se determinó que la herramienta de monitoreo mediante el uso de algas como bioindicadores fue satisfactoriamente probada en la detección de los efectos tóxicos de los drenajes sobre los cuerpos de agua impactados.

De esta manera se finaliza un abordaje general al manejo de los drenajes de mina a nivel internacional desde el inicio de los trabajos mineros hasta la clausura de los mismos, y se procede a realizar una breve descripción del manejo de los drenajes de mina en Colombia.

6. APROXIMACIÓN AL MANEJO DE DRENAJES DE MINA EN COLOMBIA

Para el manejo de los drenajes de mina en el país, existe una serie de herramientas como manuales, fichas técnicas, normas, entre otras, que permiten reconocer a los drenajes de mina como una de las problemáticas ambientales del sector minero que se debe considerar, entre la reglamentación más relevante se encuentra:

- la Guía Minero Ambiental de Explotación⁴⁷ contempla en la ficha CME – 07-06 el manejo de aguas residuales mineras, en donde se contemplan medidas de prevención, Corrección y mitigación para los momentos de explotación, cierre y abandono de las minas, como la desviación de los drenajes de mina generados de las labores subterráneas, la aireación y neutralización con cal de los drenajes ácidos formados, el recubrimiento de estériles y relaves de mina y el manejo de aguas de escorrentía superficial.
- La metodología General para la Presentación de Estudios de Impactos Ambientales, en la que aunque no se define explícitamente el tema de los drenajes de mina, se sabe que para un proyecto minero estos deben ser contemplados como uno de los principales impactos ambientales que genera esta actividad, así mismo, mediante este instrumento se otorga la licencia ambiental dentro de la cual debe estar contemplado el cierre de minas que incluye el manejo de los drenajes.
- El decreto 1594 de 1984 art 72, 74, en donde se indican las concentraciones para el control de ciertas sustancias de interés sanitario para vertimientos entre los que se encuentran algunos componentes de los drenajes ácidos

⁴⁷ Ministerio de Minas y Energía – Ministerio del Medio Ambiente. Guía Minero Ambiental de Explotación, Manejo de Impactos Ambientales. Ficha Técnica CME-07-06.

como arsénico, cadmio, cobre, cromo, y los valores restrictivos para pH, temperatura, entre otros; sin embargo con el decreto 3930 que aún no ha sido oficializado, se espera que la normatividad que rige la calidad de los vertimientos sea más restrictiva ya que esta viene por tipo de industria y contempla las aguas subterráneas que se relacionan directamente con los drenajes de mina.

- La ley 685 de 2001, donde se establece en el capítulo XX los aspectos ambientales que deben ser considerados en los proyectos mineros, en el artículo 209 se explica la obligatoriedad del beneficiario a realizar todas las obras y poner en práctica las medidas necesarias para ejecutar el cierre o abandono de las operaciones de trabajo y se le exige una extensión de la garantía de cumplimiento ambiental de 3 años después de la fecha de terminación del contrato; de esta manera queda implícito el manejo de los drenajes de mina dentro de las obras de mitigación que deben hacerse en la clausura y post clausura del proyecto minero.
- El decreto 2820 de 2010, establece en su artículo 40 la fase de desmantelamiento y abandono, en donde el titular del proyecto deberá presentar con un periodo mínimo de anticipación de 3 meses un estudio que contenga como mínimo la identificación de los impactos ambientales presentes al momento del inicio de la fase de desmantelamiento, plan de abandono y desmonte, costo de las actividades de desmonte y abandono, entre otros.

A pesar de la normativa existente en Colombia para el manejo de impactos ambientales como los drenajes de mina, la realidad de la explotación minera en el país es diferente, teniendo en cuenta que gran parte de las que generan DAM son las de carbón y oro. Se conoce por ejemplo que la mayoría de la producción de oro proviene de la pequeña y mediana minería con explotaciones de tipo

artesanal, en más del 50% de los casos es ilegal,⁴⁸ esto hace que la etapa de desmonte y desmantelamiento en muy pocas ocasiones se lleve a cabo adecuadamente. En general una vez se finaliza el periodo de explotación se procede al abandono de la mina con la consecuente problemática ambiental y social que esto genera, en la imagen 26 se muestra una mina típica abandonada con problemas de drenaje ácido de mina.

Imagen 26. Túnel de Minería Artesanal Abandonado en California Santander



Fuente: El Autor

6.1 ASPECTOS A MEJORAR EN EL MANEJO DE DRENAJES DE MINA EN COLOMBIA

Entendiendo los drenajes de mina como uno de los impactos ambientales más importantes de la explotación de algunos minerales, se debe reconocer que la normatividad ambiental de Colombia en lo referente al manejo de estos es

⁴⁸ Ministerio del Medio Ambiente, Dirección General Ambiental Sectorial. Diagnóstico y Proyecciones de la Gestión Minero Ambiental para las Regiones Auríferas de Colombia. Bogotá, 2002.

insuficiente. Esto puede observarse tan solo con analizar los plazos de entrega de los planes de cierre de mina que en nuestro país deben hacerse como mínimo 3 meses antes de que inicie la fase de desmonte, sin embargo, en países con un amplio camino recorrido en el tema minero los planes de cierre deben entregarse y ejecutarse durante toda la vida útil de la mina.

En Perú por ejemplo el plan de cierre debe entregarse hasta máximo un año después de concedida la licencia ambiental según los art 6 y 7 de la ley 28090 y deben ser planes de cierre concurrentes, es decir que se van ejecutando y modificando a medida que la mina va desarrollando sus diferentes ciclos de vida, en otros países como Chile, Canadá, entre otros, la situación es similar. De esta manera se puede prevenir o minimizar que por causas de fuerza mayor como crisis por caída en el precio de minerales, una compañía minera no cuente con los suficientes recursos para cumplir con un adecuado plan de cierre que debe realizar al final de sus operaciones, y que por causa de esto se generen pasivos ambientales que posteriormente asume el estado.

Por otra parte según la normatividad colombiana la prenda de garantía una vez iniciada la fase de desmonte de la mina es de 3 años posteriores a la finalización de esta fase, hecho que es muy incoherente teniendo en cuenta que los drenajes de mina se mantienen por años o décadas, y que a veces toman periodos prolongados para formarse. Desde esta perspectiva parece inadecuado tomar una decisión arbitraria de 3 años de cuidado y monitoreo de los mismos, ya que primero deben exigirse estudios que demuestren la baja reactividad de los minerales como estériles y relaves que permanecerán en las actividades post cierre, adicionalmente se debe demostrar que las estrategias utilizadas para evitar el proceso de formación de DAM son adecuadas. Estas exigencias pueden ejecutarse para los casos en que los proyectos cuentan con licencias ambientales y pueden ser regulados por las autoridades minero – ambientales, sin embargo,

en Colombia se ha demostrado que el 50% de la explotación minera es ilegal⁴⁹ y que esta va en aumento debido a que es impulsada por algunos grupos al margen de la ley, o simplemente por la necesidad de tener un sustento diario.⁵⁰ Para estos casos la regulación ambiental es precaria o nula, debido a que no se puede adjudicar legalmente el cierre adecuado de una mina, adicionalmente estos grupos de personas no poseen los recursos ni la conciencia ambiental para ejecutar los cierres y tratar los drenajes de mina de manera voluntaria.

Para esta problemática, el estado ha venido combatiendo la minería ilegal a través de cerramientos forzados de las minas⁵¹, brindando otras alternativas para el sustento diario de las personas, decomisando maquinaria pesada que se utiliza para la explotación minera, entre otras acciones, Sin embargo, todas estas se limitan a evitar que la explotación se siga expandiendo, pero en muchos casos las minas junto con sus pasivos permanecen contaminando cuerpos hídricos y suelos, e incluso generando enfermedades a las personas que viven en zonas aledañas ya que pueden ingerir estas aguas.

Para mitigar este problema, en el presente trabajo de monografía se propone una alternativa que pretende realizar el aprovechamiento económico de los subproductos de tratamiento de los drenajes de mina, por ejemplo se conoce que los metales presentes en el drenaje se pueden recuperar de acuerdo a sus concentraciones y que estos pueden ser vendidos en el mercado sin necesidad de recurrir a una explotación minera para producirlos, por otro lado los lodos provenientes del tratamiento de los DAM tienen altos contenidos de ferrihidrita que puede ser utilizados y comercializado en la industria de los pigmentos, el lodo generado en los drenajes neutros de mina contiene elevadas cantidades de sulfato de magnesio que puede extraerse para la producción de yeso. Toda vez que los

⁴⁹ Redacción Judicial, Diario el Espectador. Minería Ilegal en Expansión. Bogotá, Octubre 4, 2011.

⁵⁰ Ministerio del Medio Ambiente, Dirección General Ambiental Sectorial. Op. cit., p 74.

⁵¹ Agencia Peruana de Noticias, ANDINA. Perú y Colombia Colaborarán Contra la Minería Ilegal y la Pobreza. Febrero, 2014.

pasivos ambientales como los drenajes puedan generar posibilidades económicas, estos dejarán de serlo para convertirse una oportunidad, especialmente para las personas que sufren más de cerca la problemática, sin embargo, hace falta aún investigación acerca de las formas de obtención, purificación y comercialización de estos productos, al igual que estudios de mercado que permitan conocer su viabilidad económica. Para dar soporte a esta idea, se cuenta con la primera planta en Canadá en donde han venido dragando el lodo acumulado durante décadas por un drenaje ácido, y lo han venido transformando en un producto comercializable para la industria de los pigmentos⁵².

Finalmente uno de los componentes más importantes en el manejo de los drenajes de mina y en general de los impactos ambientales generados por la minería, es la educación que se imparte a las generaciones presentes y futuras, ya que al igual que otras industrias como las del petróleo, la minería se proyecta como uno de los motores de la economía y necesita de personas preparadas que sean capaces de afrontar los retos que genera esta actividad no solo en la parte de extracción y beneficio, sino que también en materia ambiental.

En la actualidad son pocos los grupos de investigación con los que se cuenta en el país para la generación de nuevo conocimiento en el campo de los impactos ambientales de minería, y no se cuenta con una entidad específica que genere nuevo conocimiento en esta área, en Chile por ejemplo se encuentra el programa DAZA de la fundación Chile al cual están asociadas diferentes universidades que se dedican al desarrollo de avances tecnológicos para la prevención tratamiento y mitigación de DAM. En Canadá se cuenta con el programa MEND desarrollado inicialmente por la universidad de British Columbia, el cual ha podido fortalecer la normatividad ambiental en este país respecto al manejo de los impactos ambientales como los drenajes ácidos, Sin embargo, en Colombia no todas las personas involucradas con actividades mineras pueden acceder a un nivel técnico

⁵² Gestión en Cierre de Minas. Op. cit., p 18.

o profesional de estudio ya que gran parte de los pequeños y medianos mineros son grupos de campesinos e indígenas⁵³, y por esta razón se hace necesario que el Gobierno Nacional a través de ministerios, universidades, corporaciones autónomas, ONGs, entre otras, capaciten y apoyen las personas que desempeñan la minería artesanal en lo referente a los impactos ambientales y sociales que genera este tipo de explotación, para que poco a poco se puedan ir adoptando otras prácticas menos contaminantes.

⁵³ Ministerio del Medio Ambiente, Dirección General Ambiental Sectorial. Op. cit., p 74.

7. CONCLUSIONES

- 1.** Los drenajes ácidos de mina representan uno de los principales impactos ambientales de la minería, los cuales posteriormente se convierten en pasivos por falta de información y normatividad para su adecuado manejo y control.
- 2.** La normatividad minero- ambiental de Colombia en la actualidad es muy precaria, ya que aún no se cuenta con un código de minas actualizado que permita fortalecer las políticas ambientales para esta actividad económica.
- 3.** Cuando se pretenden iniciar trabajos de explotación minera ya sea a cielo abierto o de forma subterránea para minerales como carbón, oro, hierro, cobre, entre otros, es necesario tener en cuenta las diferentes etapas para el manejo adecuado de los DAM (predicción – Prevención – tratamiento).
- 4.** La obtención de beneficios económicos de los drenajes ácidos de mina podría convertirse en una opción para mitigar esta problemática ambiental, ya que en la mayoría de los casos, es necesario tratar los DAM para poder obtener los materiales de interés como tintes y materias primas para materiales de construcción, e incluso los metales disueltos en el agua.
- 5.** En general los trabajos de Restauración ecológica representan uno de los grandes desafíos de la minería, ya que impactos como los drenajes ácidos de mina hacen que esta tarea sea casi imposible de llevar a cabo, sin embargo, en la actualidad se evidencian resultados muy optimistas en materia de recuperación de ecosistemas impactados por minería.
- 6.** El uso de indicadores biológicos para ecosistemas acuáticos impactados por drenajes ácidos de mina ha demostrado ser una herramienta muy útil para complementar la información aportada por los análisis fisicoquímicos que normalmente se realizan en los estudios de impacto ambiental y monitoreos de rutina, y que no permiten visualizar completamente el estado de un cuerpo hídrico.

8. RECOMENDACIONES

- 1.** Establecer alianzas entre universidades Colombianas con los grupos de investigación pioneros en los temas de manejo y control de impactos ambientales mineros como el MEND e INAP de Canadá, DAZA de Chile, entre otros para fortalecer el conocimiento y la experiencia en esta temática.
- 2.** Incrementar la participación de las Universidades y demás entes investigadores en la elaboración del marco jurídico minero- ambiental, para fortalecer la política Ambiental y minera del país.
- 3.** Elaborar inventarios de los pasivos ambientales a nivel nacional que permitan conocer el estado actual de la problemática, pero sobretodo que permitan la ejecución de acciones concretas para mitigar los impactos causados por la minería.
- 4.** Realizar estudios de salud pública donde se pueda establecer los efectos causados por impactos ambientales como los drenajes ácidos de mina, ya que se conocen casos en donde los habitantes hacen uso de fuentes hídricas contaminadas con DAM como la región Soto – Norte de Santander.
- 5.** Promover una mayor integración entre las Universidades del país y la pequeña y gran minería, para fortalecer la investigación y mejorar las prácticas ambientales actuales en materia de minería.
- 6.** Desarrollar investigaciones encaminadas a la obtención de beneficios económicos a partir de los drenajes ácidos de mina existentes, para poder transformar este pasivo ambiental en una oportunidad económica, especialmente de la población directamente afectada por los DAM.

BIBLIOGRAFÍA

1. PRICE A, William. Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials. Canadá. Diciembre,2009, total version. British Columbia, Canadá. Diciembre 2009. Reporte 1.20.1.
2. TREMBLAY, Gilles; HOGAN, Charlene. “International Network for Acid Prevention. The GARD Guide” [en línea] mayo 2012. [citado en 12 de Abril de 2014]. Disponible en la web: <<http://www.gardguide.com/index.php/>>
3. Reclamation Research Group. Acide Mine Drainaje and Effects on Fish Health and Ecology: A Review. Anchorage, Alaska. Junio, 2008. 99501.
4. GESTIÓN EN CIERRE DE MINAS. Perú. (marzo – septiembre, 2013, Perú) Cámara Minera del Perú. [diapositivas]
5. PEREZ VEGA, William y ORTIZ PEÑA, Javier. Manejo de Drenajes Ácidos de Mina. Trabajo de Grado Especialista en Ingeniería Ambiental. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico- químicas, 2009.
6. MORENO JEREZ, Raúl y JIMENEZ JAIMES, Jazmín Rocío. Mejoramiento del Actual Tratamiento Activo y Propuesta de un Método Pasivo para el Manejo de Drenajes Ácidos en el Distrito Minero Auroargentífero Vetas – California (Santander). Trabajo de Grado Especialista en Ingeniería Ambiental. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico- químicas, 2012.
7. POSADA OTÁLORA, Luz Mery. Estudio de las Principales Técnicas de Remediación de Efluentes Líquidos Contaminados por Drenajes Ácidos de Minas de Oro en Colomiba. Trabajo de grado Especialista en Química Ambiental. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias, 2011.
8. GLEISNER, Magdalena; HERBERT Jr, Rogner y FROGNER KOKCUM, Paul C. Pyrite Oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans* at Various Concentrations of Dissolved Oxigen. En: Chemical Geology. 2006. Vol 225, p 16-29.
9. NATARAJAN, K.A.; SUBRAMANIAN, S y BRAUN, Jean Jaques. Environmental Impact of metal Mining- Biotechnological Aspects of Water Pollution and Remediation – an Indian Experience. En: Journal of Geochemical Exploration. 2006. Vol 48, p 45 – 48.

10. NATARAJAN, K.A. Microbial Aspects of Acide Mine Drainage and its Bioremediation. En: Transaction of Nonferrus Metals Society of China. Noviembre 2008. Vol 18, p 1352 – 1360.
11. MAHMOUD K.K; LEDUC, L.G. y FERRONI, L.C. Detection of *Acidithiobacillus ferrooxidans* in Acid Mine Drainage Environments Using Fluorescent in situ Hybridization (FISH). En: Journal of Microbiological Methods. 2005. Vol 61, 33-45.
12. GRAY, N. F. Acid Mine Drainage Composition and the Implication for its Impacts on Lotic Systems. En: Pergamon. November 1997, vol 32, p 2132 – 2134.
13. SILVA, Luis F.O., et al. Study of environmental pollution and mineralogical characterization of sediment rivers from Brazilian coal mining acid drainage. En: Science of the Total Environment. February 2013, Vol 447, p 169 – 178.
14. BELL, F.G., et al. Environmental impacts associated with an abandoned mine in the Witbank Coalfield, South Africa. En: International Journal of Coal Geology. 2001. Vol 45, p 195 – 216.
15. PLANTE, B; et al. Lab To fiel Scale Effects on Contaminated Neutral Drainage Prediction from the Tio Mine Waste Rocks. En: Journal of Geochemical Exploration. Noviembre, 2013. Vol 137, p 37- 47.
16. BALAGUER, Luís. Las Limitaciones de la Restauración de la Cubierta Vegetal. En: Ecosistemas. 2002. P 1-11.
17. SANCHEZ, OSCAR, et al. Temas sobre Restauración Ecológica. Instituto Nacional de Ecología. México. 2005, p 21-27.
18. PEPPAS, A et al. Use of Organic Covers for Acid Mine Drainage Control. En: Minerals Engineering. Junio 2000. Vol 13, p 563-574.
19. SUNG AHN, Joo et al. An engineered cover system for mine tailings using a hardpan layer: A solidification/stabilization method for layer and field performance evaluation. En: Journal of Hazardous Materials. Septiembre 2011. Vol 197, p 153-160.
20. VIGNEAULT, Bernad et al. Geochemical Changes in Sulfidic Mine Tailings Stored Under a Shallow Water Cover. En: Elsevier. Junio 2000. Vol 35, p 1066-1076.
21. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería. España. 2004, p 112-116.
22. SHEORAN, A.S; SHEORAN, V. Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. En: Journal of Minerals Engineering. 2005. vol 19, p 105-116.

23. ROBBINS, E.I., et al. Hydrobiogeochemical interactions in 'anoxic' limestone drains for neutralization of acidic mine drainage. En: FUEL. Vol 78. 1999, p 259- 270.
24. WATTEN, Barnaby et al. Acid Neutralization Within Limestone Sand Reactors Receiving Coal Mine Drainage. En: Environmental Pollution. Junio, 2005. Vol 137, p 295-304.
25. MATTHIES, Romy et al. Performanse of a Pasive Treatment System for Net Acidic Coal Mine Drainage over Five Years of Operation. En: Science of the Total Environment. Julio 2010. Vol 408, p 4877-4885.
26. MACIAS, Francisco et al. From highly polluted Zn-rich acid mine drainage to non-metallic waters: Implementation of a multi-step alkaline passive treatment system to remediate metal pollution. En: Science of the Total Environment. Julio 2012. Vol 433, p 323-330.
27. OBERHOLSTER, P.J, et al. An ecotoxicological screening tool to prioritise acid mine drainage impacted streams for future restoration. En: Environmental Pollution. Enero 2013. Vol 176, P 244-253.
28. Ministerio de Minas y Energía – Ministerio del Medio Ambiente. Guía Minero Ambiental de Explotación, Manejo de Impactos Ambientales. Ficha Técnica CME-07-06.
29. Ministerio del Medio Ambiente, Dirección General Ambiental Sectorial. Diagnóstico y Proyecciones de la Gestión Minero Ambiental para las Regiones Auríferas de Colombia. Bogotá, 2002.
30. Redacción Judicial.. Minería Ilegal en Expansión. Diario el Espectador Bogotá, Octubre 4, 2011.
31. GARGUREVICH, Juan. Perú y Colombia Colaborarán Contra la Minería Ilegal y la Pobreza. En: Agencia Peruana de Noticias, ANDINA . Lima, Perú. Febrero, 2014.

