



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**USO DE RESIDUOS MINEROS COMO
RELLENO EN MINAS SUBTERRÁNEAS
Y CRITERIOS PARA UN MARCO
REGULATORIO**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera de Minas y Metalurgista

P R E S E N T A

Evelina de la Luz Ambrocio Rosales

DIRECTOR DE TESIS

M.I. José Enrique Santos Jallath



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Estamos hechos para conquistar entornos,
resolver problemas, alcanzar metas, y no
encontramos ninguna satisfacción real o
felicidad en la vida sin obstáculos que
conquistar y objetivos a alcanzar.*

Maxwell Maltz

Dedico esta tesis a mis padres Pedro Ambrocio de Jesús ✝ y Carmen Rosales Archundia por el amor, esfuerzo y apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida y por ser un modelo a seguir cuando se trata de esforzarse para conseguir lo que se desea.

A mis hermanos Pedro ✝ y Héctor ✝, porque donde estén, sé que ésta etapa sería para ellos motivo de orgullo y alegría, al igual que para mis dos amados hermanos, Juan Carlos y Oswaldo, de los cuales me siento muy afortunada y orgullosa de tener porque siempre han estado para enseñarme, apoyarme y motivarme.

Al amor de mi vida Armando Treviño Rodríguez a quien agradezco infinitamente su amor, apoyo, paciencia y confianza, lo que me permitió, a pesar de todos los obstáculos que se han presentado, lograr éste objetivo.

A mi amado hijo Héctor Armando, que con su cariño y su sonrisa es la personita que se ha convertido en mi mayor motivo para luchar y no rendirme.

A mis sobrinos Citlali, Pedro y Victoria por su cariño.

A mis amigos Adrián, Miguel y Erick por estar siempre conmigo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México que a través de la Facultad de Ingeniería me acogió y me brindó la oportunidad de cursar esta bonita e interesante carrera “Ingeniería de Minas y Metalurgia”.

A mi director de tesis, M. I. José Enrique Santos Jallath por el tiempo, dedicación y apoyo brindados para llevar a cabo éste trabajo. Gracias por la confianza que me ha brindado y por el aprendizaje que me ha transmitido a lo largo del periodo de la elaboración de esta tesis y fuera de este.

A mis sinodales José de Jesús Huevo Casillas, Ana Alejandrina Castro Rodríguez, Javier Mancera Alejandrez y Soledad Viridiana Guzmán Herrera, por el tiempo dedicado a la revisión de éste trabajo y sus valiosas aportaciones.

A todos los que fueron mis profesores en la carrera de Ingeniería de Minas y Metalurgia por los conocimientos transmitidos y las experiencias compartidas.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABLAS.....	XI
RESUMEN	XII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. RESIDUOS MINEROS.....	5
2.1 Clasificación de los residuos mineros.....	5
2.2 Residuos de la explotación subterránea del mineral	5
2.3 Residuos de la concentración de minerales.....	5
2.3.1 Residuos provenientes de los procesos de flotación	6
2.3.2 Residuos provenientes de los procesos de lixiviación/cianuración	7
2.3.3 Residuos provenientes de los procesos de concentración gravimétrica	9
2.3.4 Residuos provenientes de la concentración magnética.....	10
2.4 Características de los jales y terreros.....	11
2.4.1 Características y composición de los jales	11
2.4.2 Características de los terreros.....	13
2.5 Oxidación de residuos mineros y generación de drenaje ácido	13
2.5.1 Proceso de generación del drenaje ácido	14
2.5.2 Disolución de elementos traza	16
2.6 Neutralización del drenaje ácido.....	18
2.7 Efectos del drenaje ácido en el ambiente	20
3. MARCO REGULATORIO PARA EL MANEJO DE RESIDUOS MINEROS	22
3.1 Aspectos que marca la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.....	22
3.1.1 Política Ambiental	22
3.1.2 La disposición de residuos mineros.....	22
3.1.3 La autorización para la disposición de residuos mineros.....	23
3.2 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos.....	23
3.2.1 Lineamientos generales para la disposición de residuos.....	23

3.2.2 Aspectos que marca el Reglamento de la LGPGIR	24
3.3 Normatividad en la disposición de residuos	24
3.3.1 NOM-141-SEMARNAT-2003	24
3.3.2 NOM-155-SEMARNAT-2007 y NOM-159-SEMARNAT-2011	25
3.3.3 NOM-157-SEMARNAT-2009, planes de manejo de residuos minero-metalúrgicos	26
3.5 Criterios internacionales para el relleno de minas	26
3.5.1 Canadá.....	27
3.5.2 Australia	28
3.5.3 Sudáfrica.....	29
4. CONCEPTOS GENERALES DEL RELLENO DE MINAS	31
4.1 El relleno en las minas subterráneas.....	31
4.1.1 El relleno como parte del método de minado	32
4.1.2 El relleno como elemento de soporte.....	32
4.2 Características de los materiales empleados como relleno.....	34
4.2.1 Tepetate	35
4.2.2 Jales	36
4.3 Aspectos técnicos del relleno de minas	37
4.3.1 Características y especificaciones del relleno seco	38
4.3.2 Características y especificaciones del relleno hidráulico	39
4.3.3. Características y especificaciones del relleno en pasta	41
5. AGUA SUBTERRÁNEA Y SU PRESENCIA EN LAS MINAS	45
5.1 Acuíferos	45
5.1.1 Comportamiento de acuíferos	47
5.2 Calidad del agua subterránea.....	52
5.3 Agua dentro de las minas.....	53
5.3.1 Interacción del relleno con el agua de la mina	57
5.3.2 Hidrogeoquímica por el contacto del agua de mina con el relleno	60
5.4 Efectos ambientales del relleno	64
6. CRITERIOS PROPUESTOS PARA UN MARCO REGULATORIO.....	66
6.1 Marco regulatorio justificativo.....	66

6.2 Caracterización del sitio	66
6.2.1 Clima.....	66
6.2.2 Precipitación pluvial	67
6.2.3 Topografía	67
6.2.4 Coeficiente de escurrimiento	67
6.2.5 Infiltración de agua en suelo	67
6.2.6 Permeabilidad en rocas.....	67
6.2.7 Características estructurales de la roca.	67
6.2.8 Caracterización del macizo rocoso	68
6.3 Caracterización del acuífero.....	68
6.3.1 Identificación del acuífero.....	68
6.3.2 Estratigrafía	68
6.3.3 Clasificación del acuífero.....	68
6.3.4 Profundidad y espesor	68
6.3.5 Dirección y tipo de flujo	69
6.3.6 Composición química	69
6.3.7 Ubicación de aprovechamientos y usos del agua	69
6.4 Caracterización de los residuos mineros.....	69
6.4.1 Tipo de residuo y proceso generador	69
6.4.2 Volumen de generación	70
6.4.3 Permeabilidad de los residuos	70
6.4.4 Mineralogía y composición química.....	70
6.4.5 Potencial de generación de drenaje ácido	70
6.4.6 Potencial de liberación de metales traza	71
6.5 Obras mineras y método de minado.....	71
6.5.1 Descripción de las obras mineras.....	71
6.5.2 Descripción del método de minado	71
6.5.3 Ubicación de las obras con respecto del acuífero.....	72
6.5.4 Conducción de agua dentro de la mina.....	72
6.5.5 Sellado de rebajes	72

6.6 Monitoreo	72
6.6.1 Elaboración de un programa de monitoreo	72
6.6.2 Ubicación de puntos de muestreo dentro de la mina.....	72
6.6.3 Ubicación de puntos de muestreo superficiales	72
6.6.4 Monitoreo de pozos de observación fuera de la mina	73
6.6.5 Periodicidad del muestreo	73
6.6.6 Definición del procedimiento de muestreo	73
6.6.7 Definición de parámetros a analizar	73
7. EJEMPLOS DE APLICACIÓN	74
7.1 Ejemplo 1 “Santa Eulalia”	75
7.2 Ejemplo 2 “Charcas”	80
7.3 Ejemplo 3 “Tizapa”	84
8. CONCLUSIONES	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los residuos mineros en función del proceso que los genera, basada en la NOM-157-SEMARNAT-2009 (Semarnat 2011).	1
Figura 2. Representación esquemática de las cargas verticales de un pilar en la masa de relleno (Belem, T. y Benzaazoua, M. 2004).	34
Figura 3. Ejemplos de relleno hidráulico en rebajes abiertos (Sheshpari, M. 2015).	40
Figura 4. Esquema de los diferentes tipos de acuíferos de acuerdo con la presión hidrostática del agua contenida en ellos (Areaciencias 2017).	46
Figura 5. Acuífero de poros (Werner, J. 1996).	47
Figura 6. Acuífero de grietas (Werner, J. 1996).	47
Figura 7. Acuífero Cárstico (Areaciencias 2017).	47
Figura 8. Dirección del flujo (Iturbe, R. y Silva, A. 1992).	50
Figura 9. Flujo natural de agua en una zona sin minar.	54
Figura 10. Alteración del flujo de agua y caída del nivel freático por efecto de la excavación de obras mineras.	55
Figura 11. Flujo preferencial de agua a través de la interfase roca/relleno.	58
Figura 12. Flujo de agua a través de una masa de relleno permeable.	58
Figura 13. Alteración del flujo del agua por efecto de la colocación de relleno impermeable o poco permeable en rebajes.	59
Figura 14. Dependencia de la solubilidad para aluminio e hidróxidos de hierro. Nótese que debajo de un pH neutro, la solubilidad de estas fases incrementa con la disminución del pH. Esto enfatiza el rol del pH como variable principal de control de la solubilidad (Younger, P. et al. 2002).	61
Figura 15. Dependencia del pH de la adsorción de algunos iones metálicos en hidróxido de hierro (Younger, P. et al. 2002).	63
Figura 16. Columna estratigráfica de la Carta Aquiles Serdán H13-C67 (Moreno, L. 2016)	76
Figura 17. Mina San Antonio, columna estratigráfica (Tellez, R. 2001).	78
Figura 18. Esquema que representa el sistema de distribución de relleno hidráulico en mina Santa Eulalia, acompañado de la representación del flujo de agua y del sistema de bombeo (Peña, J. 1987).	79
Figura 19. Columna estratigráfica de Charcas (Martínez, M. 2000).	82
Figura 20. Esquema del acuífero con respecto a la mina (Neri, M. 2014).	85
Figura 21. Geología de la mina Tizapa (Isidro, M. 2014).	86

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Minerales de ganga presentes en el beneficio de concentrados metálicos (Cheminova 2016; Azareño, A. et al.2009; Abarca, J. 2011).	6
Tabla 2. Nombre, fórmula química, y elementos traza de minerales sulfurosos comunes (Lottermoser, B. 2007).	17
Tabla 3. Minerales que amortiguan protones producidos durante el intemperismo de sulfuros, sus rangos de amortiguamiento son aproximados (Wolkersdorfer, C. 2006).	19
Tabla 4. Casos que han reportado generación de DA proveniente de residuos mineros en México (Salas, É. 2014 ¹ ; Hernández, J. 2015 ² ; Romero, F. et al. 2008 ³ ; Lee, G. et al. 2002 ⁴).	20
Tabla 5. Casos de contaminación de acuíferos por la liberación de metales pesados a partir de operaciones mineras (Espino, V. 2014 ⁵ ; Armienta, M. y Rodríguez, R. 2016 ⁶).	21
Tabla 6. Efectos de las características de los jales en las propiedades de ingeniería, seguridad y ambiente, atribuibles al comportamiento del relleno (European Commission 2009).	36
Tabla 7. Valores típicos de porosidad que presentan algunos materiales (Baquero, J. 1998).	48
Tabla 8. Valores típicos de permeabilidad horizontal (Baquero, J. 1998).	50
Tabla 9. Clasificación del agua de minas con base en el pH (Lottermoser, B. 2007).	56

RESUMEN

El relleno de minas subterráneas es una actividad que se ha realizado por muchos años alrededor del mundo y que está permitida legalmente en México. La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) y su Reglamento establecen que los residuos mineros pueden ser colocados como relleno en las minas subterráneas conforme a las normas oficiales establecidas. La problemática radica en que, a la fecha, dichas normas no han sido expedidas y se requieren, porque es necesario controlar las actividades de relleno, para evitar o minimizar en lo máximo posible los efectos ambientales que podrían presentarse, especialmente sobre el agua, por el manejo inadecuado de los residuos mineros.

Se realizó una investigación de los factores que involucran las actividades de relleno y se hizo una selección de ellos para realizar la propuesta de los criterios que se deben considerar al elaborar una norma que las regule, con base en las características de los diferentes tipos de residuos y de relleno, de las condiciones presentes en las obras mineras, así como de la presencia y comportamiento del agua subterránea.

Los criterios propuestos también se determinaron con base en las normas oficiales mexicanas que establecen especificaciones para la caracterización de residuos y para la caracterización de sitios de disposición final (NOM-141-SEMARNAT-2003, NOM-155-SEMARNAT-2007, NOM-159-SEMARNAT-2011 y NOM-157-SEMARNAT-2009), así como para el control de la calidad del agua (NOM-127-SSA1-1994 y NOM-011-CONAGUA-2000).

1. INTRODUCCIÓN

Los Residuos Mineros son definidos por la norma oficial mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009 como todos aquellos provenientes de las actividades de explotación y beneficio de minerales o sustancias (Semarnat 2011). Esta norma también establece una clasificación de ellos en función del proceso que los genera, que se muestra en la Figura 1. Estos materiales pueden representar un problema ambiental al convertirse en fuentes de contaminación a causa de un manejo inadecuado, relacionando su presencia con el incremento de la generación de Drenaje Ácido (DA) y con la liberación de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) a los cuerpos de agua subterráneos y superficiales.

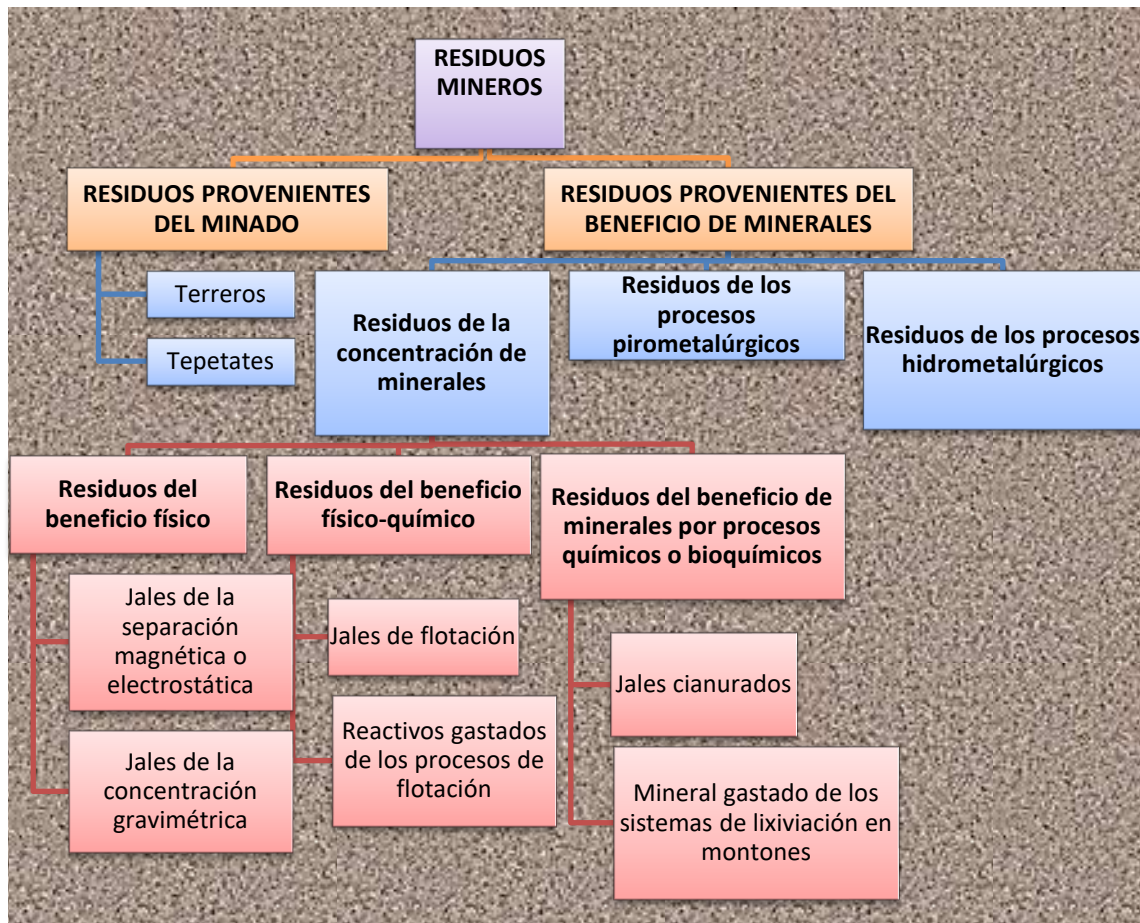


Figura 1. Clasificación de los residuos mineros en función del proceso que los genera, basada en la NOM-157-SEMARNAT-2009 (Semarnat 2011).

Particularmente, los jales, los terreros y el tepetate son los residuos sólidos que se generan en mayores cantidades en las operaciones mineras, por lo que es importante analizar sus posibles implicaciones ambientales relacionadas con su producción y su disposición final.

Los jales son generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales (Semarnat 2004), incluyen a los generados por el beneficio físico (jales de la separación magnética, gravimétrica o electrostática), los del beneficio físico-químico (jales de flotación), y los de procesos químicos o bioquímicos (jales cianurados). Para su disposición final, comúnmente se emplean las presas de jales, en las que están sometidos a condiciones atmosféricas y de estabilidad que favorecen su intemperismo.

Otro de los métodos más comunes de disposición final de residuos mineros que han empleado las empresas mineras durante varios años es el relleno de obras con jales y tepetate (European Commission 2009), el cual ha constituido un sistema de soporte, sin embargo, no se habían contemplado sus posibles impactos ambientales. A pesar de ello, actualmente se implementa su utilización gracias a que también permite maximizar las recuperaciones de los minerales de interés, se utiliza como plataforma de trabajo en algunos sistemas de explotación, posibilita reducir la cantidad de materiales que se disponen en superficie, mitigar el riesgo de subsidencia del terreno y minimizar las alteraciones del paisaje y topográficas, lo que se refleja en la reducción de riesgos ambientales ocasionados por el intemperismo superficial, proporcionando ventajas operativas y de costos de capital (Ercikdi, B. 2009; Choudhary, B. y Kumar, S. 2013).

Los residuos mineros al ser colocados en los sitios de disposición final se encuentran expuestos a las condiciones particulares de cada lugar (por ejemplo, presencia de agua, concentración de oxígeno, bacterias, temperatura y características geológicas de los macizos rocosos), a las que se suman sus características propias (como la composición mineralógica, granulometría, porosidad y grado de saturación), que en conjunto, podrían dar lugar a efectos ambientales con una repercusión económica importante a las empresas mineras. Entre las implicaciones que trae consigo la utilización de residuos mineros como relleno de minas se encuentran:

- Paisaje.- La modificación de paisaje se presenta en los sitios donde se colocan presas de jales, tepetateras, patios de almacenamiento y patios de lixiviación. Una alternativa para mitigar las alteraciones de un paisaje es la utilización de los residuos en el relleno de minas, lo que permite también, evitar exponerlos a las condiciones climáticas superficiales que promueven su desgaste, y controlar su intemperismo bajo las condiciones subterráneas de colocación.
- Subsidencia de la superficie.- Involucra una alteración topográfica que se relaciona con el flujo de cuerpos de agua superficiales, escurrimientos y con la infiltración de agua a través del fracturamiento que se genera en el terreno afectado.
- Alteraciones de la calidad del agua, generación de DA y liberación de EPT.- Relacionados con la reactividad de los residuos y de las paredes de roca de las obras, a través de sus potenciales de oxidación y lixiviación (MAC 2006), que dependen de la concentración de oxígeno, grado de saturación, flujos preferenciales de agua y de la naturaleza de los materiales (Chaparro, L. 2015).

- Alteraciones en el flujo del agua. Esto depende de las características de las obras de disposición de residuos y de las obras diseñadas para la conducción del agua, así como del macizo rocoso y de la ubicación del nivel freático de una zona (MAC 2006).
- Afectaciones en la actividad biológica con relación a la calidad del agua.
- Daños en estructuras y cimentaciones de construcciones. Como efectos de los constituyentes contenidos en un DA y de los valores de pH bajos (López, E. et al. 2002).

México dispone de un marco legislativo, normativo y reglamentario dirigido al manejo de los residuos mineros, específicamente como relleno de minas, que incluye a:

- La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) y su Reglamento, donde se establece que los residuos generados por la industria minero-metalúrgica pueden disponerse finalmente en el sitio de su generación.
- El Reglamento de la LGPGIR, estipula que los generadores podrán disponer residuos mineros en minas subterráneas, utilizando el proceso de relleno hidráulico o cualquier otro, conforme a lo establecido en las normas oficiales mexicanas. Sin embargo, esto es un punto importante por abordar, ya que actualmente no se cuenta con una norma que regule el relleno de minas.
- NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales y menciona las pruebas a las que deben ser sometidos para determinar su peligrosidad.

El conocimiento de las tendencias sobre el uso de relleno en minas permite saber cuáles son los campos científicos más desarrollados al respecto y que permiten hacer mejoras sobre las tecnologías actuales, para analizar las consideraciones que deberían tomarse en cuenta para cubrir la falta de normatividad al respecto. Dichas tendencias se enfocan en aumentar la cantidad de materiales dispuestos como relleno, realizar pruebas con mezclas de diferentes materiales como son los materiales estériles, cemento, ceniza volátil y escorias para aprovechar sus características físicas y químicas; así como en mejorar los tratamientos de deshidratación y consolidación de materiales (Vadillo, L. 1995).

Con relación al relleno de minas subterráneas, las pastas han ganado aceptación y actualmente su implementación en los sistemas de minado se está volviendo más común en el mundo, gracias a los avances tecnológicos sobre los procesos de secado de los jales y del transporte de los materiales densos, así como la justificación de los costos operativos y la reducción de la cantidad de residuos dispuestos finalmente en superficie (Newman, P. et al. 2000). Las pastas, comparadas con otros tipos de relleno, ofrecen las siguientes ventajas:

- Proporcionan mayor estabilidad local y global a las minas
- Permiten mayor recuperación de minerales provenientes de los pilares de la mina
- Permiten la colocación de la mayor parte de los jales dentro de las minas, disminuyendo impactos ambientales
- Requieren menor cantidad de agua, porque minimizan el empleo de agua fresca y permiten mayor recirculación a los sistemas de beneficio por medio de la deshidratación

- Ofrecen mayor estabilidad de las obras por haber poca filtración.

Otro de los métodos de relleno de minas comúnmente utilizado ha sido el relleno hidráulico, que en comparación con el relleno en pasta, ha mostrado tener algunas desventajas, razón por la que su utilización en las operaciones mexicanas es decreciente. Entre ellas se encuentran las siguientes (Mining, Minerals and Sustainable Development, 2002):

- Necesita grandes cantidades de agua
- Proporciona altos niveles de humedad en la atmósfera de la mina
- Incrementa el potencial de inundación por rotura de barricadas
- Se presenta deterioro de las paredes de las obras, pisos y cielos por filtraciones y falta de control de agua
- Posibilidad de producción de DA y/o liberación de EPT al agua.

Adicionalmente se encuentra con frecuencia el relleno con materiales secos que por lo general se transporta con equipo de carga, lo cual podría resultar costoso y presentar otros problemas como la posibilidad de un incremento en los potenciales de oxidación por falta de saturación y alta permeabilidad, comparándolo con los dos anteriores. Además si no se controla el porcentaje de humedad, también es posible que incremente la emisión de partículas sólidas a la atmósfera de la mina durante la operación.

Por estas razones y más que se podrán abordar con mayor detalle, resulta importante resaltar el objetivo de la presente tesis que es **analizar el uso de residuos mineros como material de relleno para las minas subterráneas y evaluar las implicaciones ambientales que esta práctica tiene, a fin de establecer criterios que puedan ser considerados en la normatividad ambiental mexicana.** Esto se puede lograr por medio del conocimiento de las condiciones a las que podría estar sometido el relleno de una mina, así como las características propias de los residuos mineros por medio de pruebas y estudios que se mencionarán a lo largo de los capítulos de este documento.

Adicionalmente se pretende analizar algunos ejemplos de minas subterráneas que han utilizado relleno para reforzar los criterios propuestos.

2. RESIDUOS MINEROS

2.1 Clasificación de los residuos mineros

En las minas donde se extraen y benefician minerales se producen dos tipos de residuos que se utilizan con frecuencia como relleno de minas, estos son: estériles (o tepetate) y jales. Los primeros se generan en las etapas de extracción, es decir, son provenientes de las obras de exploración y desarrollo que, de acuerdo con el método de minado, pueden ser coladas sobre material estéril como es el caso de niveles, socavones, rampas y contrapozos. Por otra parte, los Jales son provenientes de los sistemas de beneficio primario de minerales, entre los que comúnmente se encuentran flotación, cianuración, concentración gravimétrica y concentración magnética.

Los jales y los estériles que se generan en las unidades mineras, son materiales que por el hecho de pasar a través de distintos procesos, poseen características que implican alteraciones en su composición química, granulometría, potenciales de oxidación, de generación de drenaje ácido (DA) y de liberación de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en los cuerpos de agua, que se presentan bajo las condiciones ambientales presentes en los sitios de disposición final a las que son sometidos. El conocimiento de estas características es importante, cuando se busca implementar su uso como material de relleno de minas subterráneas, para planificar y controlar cualquier tipo de afectación a los cuerpos de agua, desde la operación hasta la etapa posterior al cierre de minas.

2.2 Residuos de la explotación subterránea del mineral

En las minas subterráneas, el material estéril que se considera residuo principalmente es tepetate, cuya fuente más relevante es el cuele de contrapozos, niveles de diferentes propósitos, tiros, socavones, rampas y piletas, que se desarrollan con los fines de tener acceso al mineral de interés y de realizar su extracción. El tepetate producido puede tener diferentes características de acuerdo con el yacimiento mineral y el método de minado, en cuanto a mineralogía, volumen generado y tamaño de partículas.

2.3 Residuos de la concentración de minerales

Las operaciones que se agrupan bajo el nombre de procesamiento de minerales pueden dividirse en cuatro grupos: reducción de tamaño, clasificación, concentración y refinación (Chica, L. 2012). Los métodos de concentración, la naturaleza de los minerales (sulfuros, especies oxidadas y/o metálicas), y sus asociaciones con los minerales de ganga, aportan las características que poseen los residuos generados en el beneficio de minerales, entre las que se encuentran: tamaño y forma de partículas, mineralogía, contenido de reactivos, contenido de agua o grado de saturación, contenido de oxígeno y pH.

Las menas metálicas aparecen con mayor frecuencia en la naturaleza en forma de elementos nativos, óxidos y sulfuros. La concentración de elementos nativos comúnmente se hace por medio de concentración gravimétrica y cianuración; para la obtención de metales a partir de óxidos se emplea la lixiviación, para los sulfuros es posible utilizar flotación, separación gravimétrica y lixiviación en menor número de casos; mientras que, para concentrar minerales ferromagnéticos se emplea la concentración magnética. Es importante mencionar que la relación entre el tipo de mineral a beneficiar y el método de concentración empleado es un proceso de selección flexible, en el que además de poder elegir el método de beneficio más adecuado, es posible combinar más de uno para obtener mejores resultados en cuanto a leyes y recuperaciones.

El conocimiento de las especies minerales de interés y sus asociaciones con los minerales de ganga, resulta de gran importancia para determinar la mineralogía de los residuos producidos en los procesos de concentración, por ser uno de los principales factores que influyen en el intemperismo de los residuos. Esto es porque cada mineral presenta diferente comportamiento frente a un proceso de beneficio y en un medio de colocación determinado, dependiendo de su naturaleza química, la cantidad en la que se encuentre presente y la interacción que tiene con los demás minerales.

2.3.1 Residuos provenientes de los procesos de flotación

La flotación de minerales aprovecha las propiedades superficiales de las partículas y sus capacidades para adherirse a burbujas de aire selectivamente; se utiliza para concentrar sulfuros complejos de Cu-Mo, Cu-Pb, Pb-Ag, Cu-Pb-Zn, Pb-Zn, Pb-Zn-Fe, Cu-Pb-Zn-Fe; minerales sulfuros que contienen oro y plata; minerales no sulfurosos (óxidos, carbonatos, fosfatos, nitratos y sulfatos), así como minerales industriales no metálicos (azufre, fluorita, talco, y carbón mineral), por mencionar algunos (Abarca, J. 2011; European Commission 2009). La flotación de sulfuros para la obtención de concentrados metálicos es el proceso más practicado.

En la Tabla 1 se presenta de manera general la mineralogía de algunos tipos de sulfuros metálicos de interés y los minerales de ganga que comúnmente los acompañan en los yacimientos minerales, y que por lo tanto, se encontrarán presentes en los jales de su beneficio.

Tabla 1. Minerales de ganga presentes en el beneficio de concentrados metálicos (Cheminova 2016; Azareño, A. et al.2009; Abarca, J. 2011).

Concentrado	Sulfuros de mena	Minerales de ganga
Oro-plata	Minerales refractarios: pirita aurífera, arsenopirita y pirrotita, galena argentífera, plata nativa, argentita (Ag ₂ S) y tetraedrita ((Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃)	Sulfuros de hierro
Plomo-zinc	Galena (PbS), esfalerita (ZnS)	Pirita, pirrotita, siderita, dolomita, calcita, cuarzo y silicatos
Cobre-plomo-zinc	Galena, esfalerita, marmatita (Zn,Fe)S y calcopirita	Silicatos, carbonatos, pirita, pirrotita y arsenopirita

Cobre	a) Sulfuros puros (calcosita y covelina); b) sulfuros de cobre y fierro (calcopirita y bornita); c) sulfuros complejos (enargita, enstatita y tetrahedrita)	Pirita, pirrotita, silicatos (cuarzo, talco y arcillas) y carbonatos
Cobre-molibdeno	Molibdenita (MoS ₂) y calcopirita	Sulfuros de fierro (pirita y pirrotita), grafito y talco
Cobre-níquel	Pentlandita (FeNi) ₉ S ₈ , calcopirita y pirrotita	Talco y otros silicatos.

Las características de los jales de flotación que resultan del control de los procesos de beneficio se enlistan a continuación:

- Mineralogía. Como se puede observar en la Tabla 1, es muy frecuente que la mineralogía de los jales provenientes de la flotación de sulfuros, se conforme por variables e importantes proporciones de pirita, silicatos y carbonatos.
- Granulometría, depende del tamaño de liberación de los minerales de interés que se determina en cada caso y de los procesos de molienda a los que son sometidas las partículas, comúnmente varía, en un amplio rango de tamaños menores a los 2 mm, es decir, tamaños característicos de las arenas o menores.
- Contenido de agua. Los productos de flotación contienen habitualmente entre un 50% y 70% de sólidos. El agua remanente en estas pulpas es posteriormente retirada mediante filtros hasta obtener un contenido que va desde un 8% hasta un 10% de humedad en el producto final (Codelco Educa 2016).
- Tipo, cantidad y efectos de los reactivos presentes en los residuos sólidos. Los residuos remanentes de los procesos de beneficio se presentan en contenidos variables, de acuerdo con el contenido de agua. Sus efectos dependen de sus concentraciones, solubilidad y de su estabilidad química bajo las condiciones presentes, un ejemplo es el pH (Conejeros, V. 2003; CYTEC 2002).
- El pH, es una característica determinante y particular en cada tipo de flotación, incluso de cada etapa en un mismo proceso de beneficio, depende principalmente de los minerales presentes en los residuos, pero también de las características del agua y de los reactivos utilizados, especialmente los modificadores de pH.

2.3.2 Residuos provenientes de los procesos de lixiviación/cianuración

La lixiviación consiste en la preparación de la mena mediante su reducción de tamaño (trituration acompañada o no de molienda) y su posterior exposición a un disolvente, con lo que se lleva a cabo una disolución selectiva de los metales. Las soluciones provenientes de la lixiviación son tratadas para recuperar los metales de interés mediante precipitación o electrólisis (Biswas, A. y Davenport, W. 1993).

La mayor parte de las menas oxidadas se tratan por lixiviación, aunque otras pocas veces también pueden tratarse sulfuros. Esto es debido a que los óxidos, al integrar en su fórmula química al oxígeno como elemento constitutivo principal, obtienen una especial facilidad para su disolución en soluciones ácidas o alcalinas. El caso contrario se da en los sulfuros y minerales nativos que por no contener oxígeno, su comportamiento frente a la lixiviación no se da de la misma forma (Dominic, E. 2016).

Las técnicas de lixiviación y cianuración¹ más utilizadas en la industria son las que se realizan en pilas, en tanques y por agitación (Encinas, M. 2016), los residuos generados por cada una de ellas poseen diferentes características:

- Los residuos generados por la lixiviación en pilas y en terreros, generalmente, al término del proceso, permanecen en superficie, constituyendo un sistema de disposición final, aunque también existen pilas dinámicas en las que el material es removido después de ser lixiviado y se reemplaza por mineral nuevo (Broggi, I. 2015). La granulometría de estos residuos comúnmente es mayor que la de los jales, aproximadamente menores a los 10 cm.
- En el caso de la lixiviación en tanques, el mineral se tritura a tamaños menores a 1 cm, el tiempo de residencia en el circuito de lixiviación es de 5 a 8 días.
- La lixiviación por agitación se emplea para tratamiento de partículas finas (90% <75 µm). Se distingue de la lixiviación en tanques, porque en este caso se promueve el movimiento de partículas por medios mecánicos o neumáticos para acelerar el proceso y realizarlo en periodos que van de 2 a 5 h (Espinoza, G. 2012). Algunas veces se realiza a temperatura de 60 °C (Biswas, A, y Davenport, W. 1993).

En el caso particular de la lixiviación por agitación y en tanques, los residuos se filtran para su disposición final en presas de jales con contenidos de humedad menores al 10%.

Con frecuencia, los residuos producidos por los diferentes tipos de lixiviación, una vez extraídos los valores, se enjuagan en espesadores para reducir las cargas contaminantes, a pesar de ello, el agua que emana de ellos, posteriormente al lavado, puede tener valores de pH ácidos o alcalinos, dependiendo principalmente, de la mineralogía del mineral gastado (Broggi, I. 2015); además se pueden presentar concentraciones de sulfatos, metales y metaloides (Lottermoser, B. 2007).

Los minerales más beneficiados por lixiviación son los que provienen de yacimientos de cobre porfídico (por ejemplo malaquita y azurita) y los elementos como los metales preciosos (oro y plata).

La lixiviación en pilas es el método hidrometalúrgico más importante en la extracción de cobre, el lixiviante utilizado generalmente es ácido sulfúrico (H₂SO₄). Es posible clasificar a la ganga según su reactividad frente al ácido en (Broggi, I. 2015):

¹ Cianuración. Se refiere a la lixiviación de metales preciosos con cianuro.

- Ganga altamente reactiva: esta categoría incluye especies minerales carbonatadas (calcita, dolomita, siderita, etc.), que reaccionan con el ácido con rapidez.
- Ganga medianamente reactiva: esta categoría significa la probable existencia de cantidades significativas de hornblenda, piroxenos y plagioclasa cálcica, que se disuelven relativamente rápido comparadas con otros silicatos.
- Ganga moderadamente reactiva: en esta categoría se encuentran la ortoclasa, biotita, albita y cuarzo.
- Ganga no reactiva: las areniscas cuarcíferas son casi inertes a las soluciones de lixiviación.

Esta información permite determinar que al final del proceso de lixiviación, y a pesar de que las pilas hayan sido estabilizadas, los residuos o el mineral gastado que las conforma tienen diferentes grados de alteración, que dependen del tipo y proporción de minerales de ganga presentes, lo que también presenta influencia en el intemperismo del mineral gastado durante una etapa de disposición final.

Los metales preciosos comúnmente son lixiviados en pilas y por agitación en tanques con diversos agentes lixiviantes, pero los más utilizados son el *Cianuro de Sodio* (NaCN) y el *Cianuro de Potasio* (KCN), porque poseen una importante capacidad de oxidación, lo que hace las prácticas de cianuración factibles comparadas con las que emplean otros agentes como el agua regia (HCl y HNO₃, proporción 3:1), tiocianato ((SCN)⁻), tiourea (SC(NH₂)₂) o tiosulfato (S₂O₃²⁻). La cianuración se realiza a pH variable de 10 a 11.5 y la recuperación de oro disuelto generalmente se hace por cementación o precipitación con zinc.

El mineral gastado generado por los procesos de cianuración, frecuentemente puede tener cianuro en el agua de poro y presentar fases de cianuro sólido. Estos residuos por lo general no generan oxidación de sulfuros ni DA, porque los minerales de oro que contienen importantes cantidades de sulfuros no son sensibles a la lixiviación con cianuro, y de ser el caso de realizar lixiviación en sulfuros, el proceso se tendría que realizar con altos valores de pH (aproximadamente 10.3). Sin embargo, estos minerales si contienen importantes cantidades de carbonatos lo que les aporta a los residuos una fuerte alcalinidad, provocando que exista en ellos poca solubilidad de elementos y deficiencia de elementos traza como Cu, Zn y Mn, que resultan en la dificultad para el crecimiento de plantas y en la generación de arcillas debido a los altos contenidos de sodio provenientes del cianuro (Lottermoser, B. 2007).

2.3.3 Residuos provenientes de los procesos de concentración gravimétrica

La concentración gravimétrica es un método de beneficio de minerales que permite separar partículas de diferentes tamaños, formas y pesos específicos aprovechando las fuerzas de gravedad y centrífugas en un medio fluido que tiene características de gravedad específica y viscosidad de las que dependen las diferencias en el movimiento provocado por las acciones que se ejercen sobre cada partícula gracias a métodos mecánicos como pulsaciones, giros y movimientos longitudinales (Pérez, A. y Mendoza, J. 2007).

Existen diversos tipos de concentración gravimétrica y diferentes equipos que se han desarrollado y utilizado para llevarla a cabo. Sin embargo, actualmente, los más utilizados son Mesas Vibratorias, los Jig y los concentradores centrífugos Knelson y Falcon.

Las mesas vibratorias aprovechan corrientes longitudinales de escurrimiento laminar para el tratamiento de partículas con tamaños de 2 a 3 mm, que serán los tamaños de los residuos generados. Estos equipos tienen capacidades variables que van de 5 a 50 t por día y se han empleado para el beneficio de hierro, arenas de playa, oro y carbón.

Los Jig aprovechan corrientes verticales y se han empleado para el tratamiento de menas de aluvión o placer, carbón y otras metálicas como casiterita, scheelita, manganeso, plomo-zinc y hierro. Estos equipos permiten el beneficio de partículas hasta de 15 cm o mayores, según la abertura de sus parrillas.

Los concentradores centrífugos son utilizados para la separación de partículas finas. Se han utilizado para el beneficio de menas auríferas, principalmente si el oro se encuentra libre, para recuperación de concentrados y para el retratamiento de colas, así como la recuperación de otros metales de alta gravedad específica como plata, mercurio, platino, hierro, sulfuros y carbón. El concentrador Knelson permite la recuperación de partículas que van desde $\frac{1}{4}$ de pulgada hasta aproximadamente $1 \mu\text{m}$ y sus capacidades pueden variar desde los 50 kg/h hasta las 150 t/h, operan con fuerzas hasta de 60 veces la fuerza de gravedad (g). El concentrador Falcon somete a las partículas finas (desde 6 mm hasta los $5 \mu\text{m}$ o menores) a fuerzas de hasta 300 g , de acuerdo con el modelo, tienen capacidades de tratamiento de 0.25 t/h hasta aproximadamente 400 t/h (Pavez, O. 2005).

En resumen, la gama de tamaños de los residuos de la concentración gravimétrica puede variar desde partículas tan gruesas de 15 cm de diámetro o mayores, hasta partículas finas de $5 \mu\text{m}$ con los equipos más modernos, la eficiencia de la separación con el tamaño de partícula proporciona a los residuos una distribución uniforme de tamaños.

Los minerales más tratados por concentración gravimétrica son, sulfuros y óxidos metálicos, minerales de oro, manganeso, plomo-zinc y fierro. Los minerales residuales de un proceso de concentración gravimétrica, al término de las operaciones de beneficio, y por no ser alterados por algún tipo de reactivos, se encuentran sometidos en una etapa de disposición final, a su propia mineralogía, tamaño y forma de partícula, contenido de agua y condiciones ambientales, que son los factores que intervienen en sus procesos de intemperismo.

2.3.4 Residuos provenientes de la concentración magnética

La concentración magnética aprovecha la diferencia en las propiedades magnéticas de las partículas, en este tipo de separación el mecanismo de selección se basa en la susceptibilidad magnética de los materiales, es decir, se busca separar las partículas ferromagnéticas de las diamagnéticas, lo que depende en la mayoría de los casos del contenido de algún compuesto de hierro en forma magnética (Pavez, O. 2005; Valderrama, L. et al. 2014).

Los materiales se clasifican en: a) *paramagnéticos*, que son débilmente atraídos cuando se exponen a un campo magnético, en la mayoría de los casos, el paramagnetismo se debe a la presencia de hierro, algunos ejemplos de este tipo de minerales son ilmenita (FeTiO_3), rutilo (TiO_2), wolframita ($(\text{Fe,Mn,Mg})\text{WO}_4$), hematita (Fe_2O_3), cromita (FeCr_2O_4), limonita ($\text{FeO}(\text{OH})\cdot n\text{H}_2\text{O}$), monacita ($(\text{Ce, La, Nd o Sm})\text{PO}_4$), elementos como Co, Ni, Cr, Al y los del grupo del platino; b) *ferromagnéticos*, que tienen alta susceptibilidad magnética y son un caso especial del paramagnetismo por conservar magnetismo remanente al alejarse del campo magnético, algunos ejemplares son magnetita ($\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$), pirrotita ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$), elementos como Fe, Ni y Co con sus respectivas aleaciones; y finalmente se encuentran los c) *diamagnéticos*, es decir, los que no son magnéticos o que se repelen a lo largo de las líneas de fuerza magnética como es el caso de los feldespatos, cuarzo, zircón, granate, oro, plata, cobre, entre otros (Pavez, O. 2005; Wassan, A. 2014).

La concentración magnética se puede realizar bajo diferentes condiciones, es decir, en seco o en húmedo, a alta o baja velocidad, con el fin de promover la acción de algunos tipos de fuerzas, sobre cada partícula.

Las características de los jales provenientes de los procesos de concentración magnética son la mineralogía, de la cual depende el tamaño de partícula para la liberación y selección de los minerales de interés, debido a que, al igual que los residuos de la concentración gravimétrica, no se emplean reactivos que alteren las características químicas de las partículas. En la composición de éstos residuos se pueden encontrar elementos como aluminio, cobre, plomo y sus aleaciones por ser metales no magnéticos.

En general, el tamaño de partícula de los residuos de éste tipo de concentración puede variar desde tamaños mayores a los 2 mm hasta tamaños de 74 μm (Salazar, C. 2011; Michaud, D. 2016).

2.4 Características de los jales y terreros

Para que la disposición final de los residuos mineros se lleve a cabo de manera segura y con el mínimo de efectos ambientales se requiere conocer sus características, que además de su composición química y mineralógica, incluyen las alteraciones producidas por los procesos metalúrgicos; así como las características geológicas del lugar donde serán dispuestos finalmente. En el caso del relleno, se trata de las condiciones presentes en las obras mineras, que se abordarán con mayor detalle a lo largo de los capítulos 4, 5 y 6 de esta tesis.

2.4.1 Características y composición de los jales

En general, los jales tienen una mineralogía muy heterogénea que varía de acuerdo con cada depósito, pueden contener *sulfuros*, como pirita (FeS_2), galena (PbS), calcopirita (CuFeS_2), argentita (Ag_2S) y arsenopirita (FeAsS); *silicatos* como cuarzo (SiO_2), wollastonita (CaSiO_3), talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), enstantita ($(\text{SiO}_6)\text{Mg}_2$), berilo ($(\text{Si}_6\text{O}_{18})\text{Al}_2\text{Be}_3$), olivino ($\text{SiO}_4(\text{Mg,Fe})_2$); *óxidos* como cuprita (Cu_2O), hematita (Fe_2O_3), rutilo (TiO_2), casiterita (SnO_4); *hidróxidos* como limonita

($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$), bauxita ($\text{AlO}_3(\text{OH})$), psilomelana ($(\text{Ba}, \text{H}_2\text{O})_2\text{Mn}_5\text{O}_{10}$), manganita ($\text{Mn}^{3+}\text{O}(\text{OH})$), brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$); *fosfatos* como apatito ($(\text{PO}_4)_3\text{Ca}_5(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$), piromorfita ($(\text{PO}_4)_3\text{Pb}_5\text{Cl}$), monacita ($\text{PO}_4(\text{Ce}, \text{La}, \text{Y}, \text{Th})$), trifilita (PO_4LiFe), wavellita ($(\text{PO}_4)_2\text{Al}_3(\text{OH})_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), *halogenuros*² como la criolita ($\text{F}_6 \text{Al Na}_3$), querargirita (ClAg), fluorita (F_2Ca), atacamita ($\text{ClCu}(\text{OH})_3$), carnalita ($\text{Cl}_2\text{KMg} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$); y *carbonatos* como calcita (CO_3Ca), dolomita ($(\text{CO}_3)_2 \text{CaMg}$), magnesita (CO_3Mg), siderita (CO_3Fe), aragonita (CO_3Ca); *sulfosales* como enargita (S_4AsCu_3), tetraedrita ($\text{S}_{13}\text{Sb}_4(\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Zn}, \text{Ag})_{12}$), stefanita (S_4SbAg_5), pirargirita (S_3SbAg_3) y proustita (S_3AsAg_3), y una gran diversidad de otros tipos de minerales (Dana, D. y Hurlbut, C. 1960). Los minerales de ganga más comunes en los depósitos de minerales metálicos son los silicatos, los sulfuros y los carbonatos, algunos de los cuales influyen fuertemente la acidez de las aguas de mina y viceversa.

Los jales poseen una granulometría particular de acuerdo con cada depósito mineral, dependiendo del grado de liberación de los minerales de mena y del método de concentración que se ha utilizado para obtener una recuperación efectiva. En general, dicha granulometría puede variar desde tamaños tan grandes como 3 mm hasta los 53 μm , dependiendo de las etapas de molienda utilizadas. Este es un aspecto importante que determina la superficie expuesta de las partículas, e influye directamente en la reactividad de los jales al encontrarse expuestos a condiciones ambientales (por ejemplo, presencia de agua, concentración de oxígeno y presencia de bacterias), que son factores determinantes en la generación de DA y liberación de EPT en el agua y que serán revisados con mayor detalle en el subtema 2.5.

Generalmente, los jales son enviados a los sitios de disposición final con diferentes cantidades de agua, dependiendo del “tratamiento de recuperación de agua”³ que se les da y de la forma en que se mandan a los lugares de su disposición final; los contenidos de agua en los jales pueden ir desde $\pm 50\%$ a $\pm 10\%$. Este parámetro tiene relación directa con el contenido de oxígeno en los residuos y con su velocidad de oxidación.

El contenido de reactivos y sus efectos también juegan un papel determinante en el proceso de intemperismo de los jales. Generalmente, los reactivos remanentes en las pulpas residuales de los procesos de concentración por flotación y por lixiviación son recuperados cuando se realiza el proceso de recuperación del agua. Sin embargo, el porcentaje de los que pudiesen quedar en los residuos, puede influir en las características de textura, reactividad y pH de los residuos, resultando en la formación de minerales secundarios y nuevamente, en la generación de DA y en la liberación de EPT.

Para cualquier tipo de residuos de los que son revisados en la presente tesis es importante conocer las características que se enlistan a continuación, por influir directamente en los procesos

² También conocidos como Haluros, los halogenuros comprenden a los fluoruros, cloruros, bromuros y yoduros naturales. Un ejemplo es la Fluorita. Esta clase química se caracteriza por el predominio de los iones halógenos (Dana, D. y Hurlbut, C. 1960).

³ Filtrado, decantación o directamente, para ser transportados por medio de bombeo, bandas transportadoras y equipos de carga.

de intemperismo y oxidación, que pueden conducir también a la generación de DA y liberación de EPT.

- Composición química (mineralogía y reactivos)
- Potenciales de oxidación
- Potenciales de generación de DA
- Potenciales de neutralización
- Granulometría
- Concentración de oxígeno
- Contenido de agua
- pH de los residuos
- Temperatura
- Presencia de bacterias

2.4.2 Características de los terreros

Los terreros son residuos conformados por apilamientos de minerales de baja ley (Semarnat 2011) que no justifiquen su beneficio o comercialización. Estos se pueden clasificar en dos tipos: 1) Terreros cuyo mineral es sometido a procesos de lixiviación y; 2) Terreros constituidos por el material estéril o de descapote, conocidos también como “tepetateras”. Los primeros, en una etapa de disposición final son conformados por los materiales que se conocen como “mineral gastado”, son provenientes de los procesos de lixiviación en pilas y su granulometría puede variar desde los tamaños característicos de las arenas, mayores a los 74 μm , hasta alcanzar los tamaños de ± 1 m (López, L. 2013).

En el caso de los terreros de estériles, su mineralogía varía de acuerdo con el tipo de yacimiento, y se caracterizan por no tener alteraciones producidas por reactivos o procesos de beneficio, por lo que únicamente, su intemperismo depende del tamaño de partículas y de la presencia de agua y oxígeno en el ambiente de colocación.

Las características que influyen directamente en la oxidación o alteraciones de los terreros de material estéril son las mismas que las de los jales, con excepción de que en este caso no se consideran concentraciones ni efectos de reactivos químicos.

2.5 Oxidación de residuos mineros y generación de drenaje ácido

Los efectos más conocidos y estudiados de los residuos mineros, debido a los problemas ambientales que podrían causar, son la generación de DA y la liberación de EPT en agua. Sin embargo, se debe mencionar que no todos los residuos generan acidez, debido a que los minerales que contribuyen mayoritariamente en este proceso son los sulfuros de hierro, a diferencia de otros minerales como carbonatos, silicatos, cationes intercambiables y algunos sulfuros, que no generan ácido y que incluso son capaces de neutralizarlo.

A continuación se aborda el tema de los procesos de generación de DA, para conocer cómo es que se genera y cómo influyen los minerales presentes en su formación y en su neutralización. Para esto es importante conocer el proceso de intemperismo de los componentes de los jales y terreros, que son los elementos que intervienen directamente.

El DA es el flujo de agua que presenta características de pH que varía entre 5.5 y 1.0, alcalinidad decreciente y acidez creciente, altas concentraciones de sulfatos (mayores a 1000 ppm) (Lottermoser, B. 2007), metales disueltos como Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, entre otros, que alcanzan concentraciones que rebasan los límites reglamentarios en agua, o que podrían ocasionar un impacto ambiental adverso; además de presentar concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales (sales, coloides) (International Network for Acid Prevention 2017; Ministerio de Energía y Minas 2017).

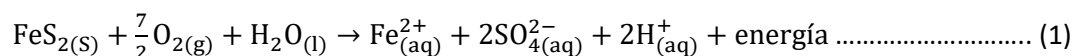
El DA resulta de la oxidación de minerales sulfurosos y de la lixiviación de elementos asociados, provenientes de las rocas cuando son expuestas a aire y agua. Su desarrollo depende del tiempo e involucra procesos de oxidación química y biológica, así como fenómenos físico-químicos, incluyendo la precipitación y el encapsulamiento (International Network for Acid Prevention 2017).

2.5.1 Proceso de generación del drenaje ácido

La generación del DA comienza cuando los sulfuros se ponen en contacto con oxígeno atmosférico y agua con concentraciones de oxígeno, a través de procesos geológicos o por medio de actividades antropogénicas como son las excavaciones mineras y la disposición final de residuos, en los que se propicia la oxidación de los sulfuros.

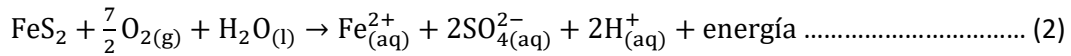
El DA es un proceso que pasa por varias etapas que van desde su generación, su liberación y movilización hasta que es neutralizado natural o antropogénicamente. El proceso de generación puede dividirse en las siguientes fases:

- Oxidación directa (puede ser biológica o no biológica): El oxígeno actúa como agente oxidante principal de los sulfuros transformándolos en sulfatos (International Network for Acid Prevention 2017). En esta etapa el pH todavía permanece con valores por encima de 4.5. Ésta fase se muestra en la Ecuación (1).

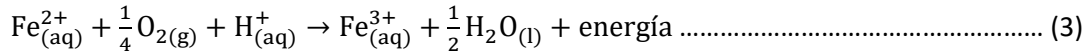


La etapa de mayor producción de acidez comienza cuando la oxidación de la pirita se lleva cabo por oxidación indirecta, que involucra la oxidación química de pirita por oxígeno y hierro férrico (Fe^{3+}), que se lleva a cabo en tres fases interconectadas:

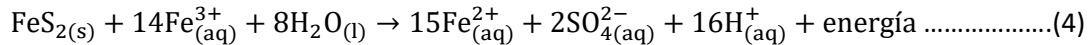
- La (fase 1) es representada por la Ecuación (2), en donde ocurre la oxidación de pirita por acción del oxígeno, en presencia de agua, formando el ion ferroso (Fe^{2+}) que será el reactivo más importante en la siguiente fase del proceso.



- La (fase 2) se refiere a la oxidación del hierro en estado ferroso a hierro férrico en presencia de oxígeno atmosférico, y se encuentra representada por la Ecuación (3).



- En la (fase 3) ocurre la oxidación de pirita por acción del hierro férrico formado en la (fase 2). Esta etapa se representa con la Ecuación (4).



El pH de la solución de desgaste influencia la abundancia del Fe^{3+} como agente oxidante, es decir, la solubilidad del Fe^{3+} es muy baja en agua neutra y alcalina. Por lo tanto, la oxidación de pirita por acción de Fe^{3+} en aguas con pH de neutro a alcalino, es lenta e insignificante. Del mismo modo, la concentración del Fe^{3+} disuelto disminuye con el incremento del pH, así que la solubilidad del Fe^{3+} se ve limitada por la precipitación de hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) y oxihidróxidos (FeOOH) (Lottermoser, B. 2007).

Los factores que influyen la velocidad de oxidación de la pirita en la generación de DA son propios de sus características mineralógicas y otros factores externos físicos, químicos y biológicos. Las características mineralógicas que menciona Lottermoser, B. (2007) son tamaño de partícula, porosidad, área superficial, cristalografía y presencia de elementos traza; entre los factores externos se encuentran la presencia de otros sulfuros, participación de microorganismos, concentraciones de gases como oxígeno y dióxido de carbono, temperatura, pH, abundancia y dinámica del agua, así como la proporción $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$.

Como se mencionó en el Inciso 2.4.1, la mineralogía de los residuos mineros puede estar integrada por otros sulfuros diferentes a la pirita, silicatos, carbonatos, cationes intercambiables y otros minerales cuyo desgaste se lleva a cabo en presencia de diferentes condiciones, y que pueden producir distintos efectos sobre el DA.

- *Sulfuros*: Los minerales sulfurosos que pueden ser potenciales generadores de acidez tienen una relación metal/azufre inferior a 1; por ejemplo, la pirita (FeS_2) y la marcasita (FeS_2) tienen una proporción 1:2 y son más ricos en azufre que la galena (PbS) y la esfalerita (ZnS) que tienen una proporción de 1:1. En consecuencia, la pirita y marcasita producen más ácido por mol de mineral que la galena y esfalerita. Cuando el drenaje se encuentra en una etapa de acidificación avanzada, los demás sulfuros metálicos son susceptibles de ser oxidados por la acción del hierro férrico.
- *Otros minerales*: Mientras algunos minerales pueden producir significantes cantidades de ácido y otros no, existen minerales no sulfurosos cuyo desgaste o precipitación puede liberar también iones de hidrógeno. Principalmente, la precipitación de hidróxidos de Fe^{3+} e hidróxidos de aluminio genera acidez. En segundo lugar, la disolución de sales de sulfato solubles de Fe^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{3+} y Al^{3+} como la jarosita ($\text{KFe}_3^{3+}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), alunita

($\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), halotriquita ($\text{Fe}^{2+}\text{Al}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$), y coquimbita ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) produce iones de hidrógeno.

En general, el incremento en las concentraciones de hidrógeno y de la producción de ácido en los residuos de mina puede ser resultado de:

- La oxidación de sulfuros ricos en Fe
- La precipitación de hidróxidos de Fe^{3+} y Al^{3+} y
- La disolución de sales de sulfatos solubles de Fe^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{3+} y Al^{3+}

Reacciones como la oxidación, la precipitación y la disolución de minerales presentes en los residuos mineros podrían incrementar la acidez de las soluciones a menos que el hidrógeno sea consumido a través de reacciones amortiguadoras producidas por los minerales de ganga que tienen la capacidad de reaccionar con los iones de hidrógeno y consumirlos. El amortiguamiento de acidez es en gran parte causado por el desgaste de silicatos, carbonatos e hidróxidos.

A diferencia de las reacciones de oxidación de sulfuros, las reacciones de amortiguamiento de ácido son independientes de la concentración de oxígeno de la fase gaseosa o del agua. Los minerales de ganga se disuelven individualmente a diferentes valores de pH y el amortiguamiento del pH de la solución gracias a los minerales individuales aparece dentro de ciertas regiones de pH. Como consecuencia, dependiendo del tipo y abundancia de los minerales de ganga en los residuos (es decir, la capacidad de amortiguamiento de los materiales), no todos los residuos sulfurosos producen lixiviados ácidos ni las mismas preocupaciones ambientales (Lottermoser, B. 2007).

2.5.2 Disolución de elementos traza

Un elemento traza se define como un elemento que está presente en una roca en concentraciones menores al 0.1% (1000 ppm). La mayoría de éstos elementos no forman especies minerales por sí solos, pero son capaces de sustituir a los elementos mayores en los minerales formadores de rocas (Espinoza, F. y López, L. 2006).

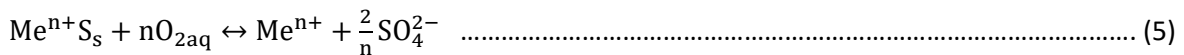
Algunos metales pesados que son considerados como elementos traza, son elementos que tienen densidad relativamente alta (mayor a 4 g/cm^3 o 5 veces y mayores a la densidad del agua) y son tóxicos o peligrosos incluso a bajas concentraciones. Los metales pesados incluyen plomo, cadmio, zinc, mercurio, arsénico, plata, cromo, cromo y hierro, así como elementos del grupo del platino (Duruibe, J. et al. 2007).

Después de que el proceso de generación de acidez tuvo lugar, se continúa con la disolución de metales y otros elementos, algunos de los cuales a concentraciones que rebasan los límites máximos permisibles son considerados EPT. Esto consiste en el enriquecimiento del agua con elementos como arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo, zinc y otros que se muestran en la Tabla 2. Estos elementos algunas veces están presentes en los residuos mineros y sus concentraciones dependen principalmente de los valores de pH presentes en el agua.

Tabla 2. Nombre, fórmula química, y elementos traza de minerales sulfurosos comunes (Lottermoser, B. 2007).

Nombre del mineral y fórmula química	Elementos traza
Arsenopirita (FeAsS), bornita (Cu ₃ FeS ₄), calcosita (Cu ₂ S), calcopirita (CuFeS ₂)	Ag, As, Bi, Cd, Co, Cr, In, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Ti, V, Zn
Cinabar (HgS), cobaltita (CoAsS), covelita (CuS), cubanita (CuFe ₂ S ₃), enargita (Cu ₃ AsS ₄), galena (PbS)	Ag, As, Bi, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Sb, Se, Sn, Ti, Zn
Mackinawita ((Fe,Ni) ₉ S ₈)	As, Hg, Se, Sn, Ti, Tl, Pb, V
Marcasita (FeS ₂), melnicobita (Fe ₃ S ₄), milerita (NiS), molibdenita (MoS ₂), oropimente (As ₂ S ₃), pentlandita ((Ni,Fe) ₉ S ₈), pirita (FeS ₂)	Ag, As, Au, Bi, Cd, Co, Ga, Ge, Hg, In, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Ti, Tl, V
Pirrotita (Fe _{1-x} S)	Ag, As, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Se, Sn, V, Zn
Rejalgar (AsS), estibinita (Sb ₂ S ₃), esfalerita (ZnS)	Ag, As, Ba, Cu, Cd, Co, Cr, Fe, Ga, Ge, Hg, In, Mn, Mo, Ni, Sb, Se, Sn, V, Zn

Cuando las condiciones de estabilidad cambian (concentraciones de oxígeno, valores de pH y conductividad eléctrica), gracias a las actividades de minado y depósito de jales, las diferentes fases minerales comienzan a oxidarse a especies más móviles que son transportadas por medio del agua hacia los puntos de menor presión hidráulica que usualmente son espacios abiertos de las minas o cuerpos de agua subterránea. Este proceso se ilustra en la Ecuación (5).



El transporte se puede hacer como especies disueltas en el agua o como parte integral de partículas sólidas. También existe un estado de transición en el que partículas muy pequeñas (menores a 10 µm), conocidas como coloides, están suspendidas en agua. Éstos coloides se agregan en partículas más grandes, es decir, sufren floculación y aparecen como partículas suspendidas en el agua. Los coloides ricos en fierro y aluminio y las partículas suspendidas son especialmente comunes en aguas con DA. Durante la erosión y el flujo superficial, los escurrimientos se enriquecen con los constituyentes de las rocas, resultando en concentraciones elevadas de uno o más elementos traza en el agua.

No en todos los casos es necesario establecer valores de pH bajos para que los metales se liberen de los residuos mineros, ya que se han establecido valores cercanos al pH neutro (pH 6-7) para algunos metales, como Zn, Cd y As (Duruibe, J. et al. 2007).

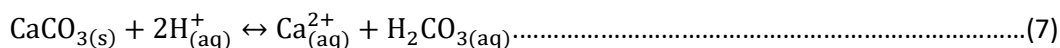
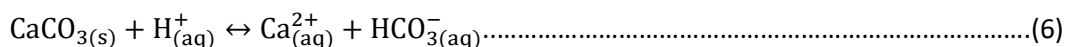
Los metales pueden ser transportados en las aguas de mina de varias formas. En aguas con DA, la mayoría de los metales aparecen como iones metálicos simples o como complejos de azufre. En aguas de mina neutras y alcalinas, las concentraciones elevadas de metales y metaloides se promueven por la formación de oxianiones (como AsO_4^{3-}) y complejos metálicos acuosos (como complejos de carbonato de U, sulfatos de Zn y complejos hidróxidos) (Lottermoser, B. 2007).

2.6 Neutralización del drenaje ácido

La neutralización se refiere al proceso en el que el ácido producido es consumido por el contacto con los minerales que tienen la capacidad de consumirlo, como es el caso de los carbonatos, hidróxidos, silicatos y arcillas que comúnmente se encuentran en la ganga, en los residuos o en la roca huésped del yacimiento mineral. Desde un punto de vista químico, estos minerales aceptan protones y amortiguan la acidez, previniendo que el agua de mina se vuelva ácida en su totalidad controlando los niveles de pH, que a su vez controla la solubilidad y la movilidad de otros metales. La base teórica de este proceso es que cada vez que la capacidad consumidora de ácido de una roca o “potencial de neutralización” excede al “potencial de generación de ácido”, se consumirá toda la acidez y el agua que drene de la roca se encontrará en el nivel de pH neutro o cerca de él.

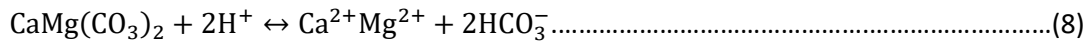
Dependiendo de la acidez del medio, los minerales que neutralizan o amortiguan el pH son capaces de consumir protones H^+ . Entre los minerales más importantes para éste proceso se encuentran:

- *Carbonatos.* Algunos ejemplos son calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), siderita (FeCO_3), ankerita ($\text{Ca}(\text{Fe,Mg})(\text{CO}_3)_2$) y magnesita (MgCO_3). La calcita es la más común en una amplia gama de ambientes geológicos y tiene una velocidad de reacción elevada comparada con la de otros carbonatos; dependiendo del pH de la solución de desgaste, la acidez es consumida por la calcita, a través de la producción de bicarbonato en ambientes de ácido débil a alcalinos (Ecuación 6) o por la producción de ácido carbónico en ambientes de ácidos fuertes (Ecuación 7).

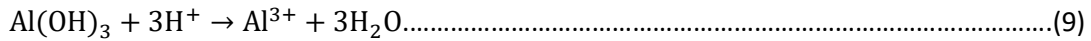


En general, la disolución de calcita neutraliza la acidez e incrementa el pH y alcalinidad en el agua. Una reacción inversa a las dos reacciones anteriores es posible cuando existe un cambio en la temperatura, pérdida de agua o pérdida de dióxido de carbono, procesos en los que la precipitación de carbonatos libera iones de hidrógeno, haciendo que el pH disminuya. La presencia o ausencia de CO_2 influye fuertemente en la solubilidad de la calcita.

En la Ecuación 8 se muestra la neutralización de acidez por la disolución de dolomita, que produce bicarbonato:

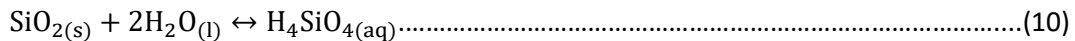


- *Hidróxidos*: Consumen acidez por la formación de un ion libre más agua. Un ejemplo es el hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) que reacciona como se muestra en la Ecuación 9:



Cuando el pH de la solución tiende a la neutralidad, la mayoría de los metales presentan baja solubilidad y precipitan en forma de hidróxidos u óxidos metálicos. Existen algunas excepciones cuando se presentan metales como el arsénico, zinc y molibdeno que pueden ser más solubles en pH alcalino.

- *Silicatos*: El desgaste químico de silicatos, como es el caso de los olivinos, piroxenos, anfíboles, granates, feldspatos, feldspatoides, arcillas y micas, es un proceso que consume iones de hidrógeno, produce cationes disueltos, ácido silícico y forma minerales secundarios. Sin embargo, algunos silicatos como el cuarzo (SiO_2), calcedonia (SiO_2) y ópalo ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) no consumen hidrógeno por desgaste, pero si producen ácido silícico como se muestra en la Ecuación 10. El ácido silícico es un ácido muy débil y no aporta significantes cantidades de iones hidrógeno a la solución a menos que el pH sea mayor a 9 (Lottermoser, B. 2007).



- *Cationes intercambiables*: Otros constituyentes importantes en los jales son los cationes intercambiables, que constituyen una fuente de neutralización. Los más comunes son los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , que se encuentran presentes en los sitios de intercambio de micas, arcillas y materia orgánica. Estos cationes pueden reemplazarse por los cationes disueltos en las soluciones de desgaste (Lottermoser, B. 2007). Durante la oxidación de los sulfuros, el hidrógeno disuelto y los iones de Fe^{2+} producidos, competirán por los sitios de intercambio catiónico. Los nuevos iones de hidrógeno y Fe^{2+} generados son eliminados de la solución y temporalmente adsorbidos dentro de sitios de intercambio de las fases sólidas. Tales reacciones de arcillas con iones de hidrógeno y Fe^{2+} disueltos pueden representarse por las Ecuaciones 11 y 12.

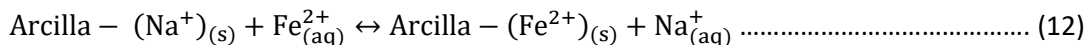
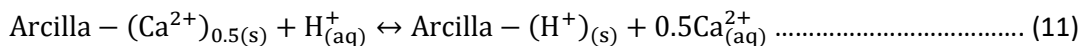


Tabla 3. Minerales que amortiguan protones producidos durante el intemperismo de sulfuros, sus rangos de amortiguamiento son aproximados (Wolkersdorfer, C. 2006).

Mineral	Fórmula	Rango de amortiguamiento del pH
Calcita	CaCO_3	6.5-7.5

Dolomita	$\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$	6.5-7.5
Siderita	FeCO_3	4.8-6.3
Carbonatos (varios)	$(\text{Ca, Mg, Fe, Mn})\text{CO}_3$	4.8-6.3
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$	4.0-4.3
Ferrihidrita	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	<3.5
Goetita	$\alpha - \text{FeOOH}$	1.3-1.8
K-jarosita	$\text{KFe}_3[(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2]$	1 - 2 (experimental)
Aluminosilicatos		1 - 2 (experimental)

La cantidad de carbonatos se relaciona directamente con la rapidez con que la acidez es amortiguada. Después de que los carbonatos han sido consumidos, los silicatos amortiguan en un pequeño intervalo de pH.

2.7 Efectos del drenaje ácido en el ambiente

Los efectos ambientales asociados a la generación de DA, se representan por la contaminación de fuentes hídricas superficiales y cuerpos de agua subterráneos, que presentan valores de pH entre 1.5 y 5, lo que representa una gran cantidad de acidez al agua gracias a la formación de ácido sulfúrico y elevadas concentraciones de elementos como cobre, plomo, arsénico, mercurio, plata, manganeso, zinc, níquel, entre otros, que en determinadas concentraciones son nocivos para la actividad biológica. Además, estas aguas pueden dañar la estructura y la cimentación de construcciones (López, E. et al. 2002) y una vez que han sido generados, el proceso de formación es cíclico e irreversible permaneciendo por varios años o décadas hasta que sea eliminado por lo menos uno de los agentes que lo causan (Jennings, S. et al. 2008; Chaparro, L. 2015).

Algunos casos que se han reportado por generación de DA y liberación de EPT en agua se enlistan en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4. Casos que han reportado generación de DA proveniente de residuos mineros en México (Salas, É. 2014¹; Hernández, J. 2015²; Romero, F. et al. 2008³; Lee, G. et al. 2002⁴).

Lugar	Presencia de DA	EPT en agua mg/L
Mina Aurora, Guanajuato ¹	pH ± 2	As: de 16.7 a 186 Cd: de 22.2 a 36.1 Cu: de 102 a 269.6 Fe: de 325.6 a 2218 Zn: de 627.6 a 1070.6
Tizapa ²	pH < 3	Fe: 562.9 Al: 40.99 Cu: 12.11 Cd: 5.797 Mn: 41.081 Zn: 482.93
Zimapán ³	Ph = 2.6	As: 0.4 a 48.7 Pb: 1.8 Cu: 2.5- 25.5

		Fe: 71.3- 897.5 Zn: 22.5- 400
Taxco ³	pH= 2.8	As: 0.04- 3.2 Pb: 0.5 Cu: 4.7 Fe: 130.2
Nacozari ³	pH= 3.0	Zn: 2.4- 185.5 As: 0.02 Pb: BLD Cu: BLD Fe: BLD Zn:0.3
Antiguo Distrito Minero de Ducktown, Tennessee ⁴	pH= 2.2 a 3.4	Zn 37.7 a 17.4 Cu 13 a 0.27 Co 1.5 a 0.52 Ni 0.36 a 0.075 Pb 0.03 a 0.008 Cd 0.03 a 0.006

Tabla 5. Casos de contaminación de acuíferos por la liberación de metales pesados a partir de operaciones mineras (Espino, V. 2014⁵; Armienta, M. y Rodríguez, R. 2016⁶).

Lugar	Presencia de DA	Afectación de acuíferos
Distrito minero San Antonio-El Triunfo, San Luis Potosí ⁵	Los jales si tienen potencial de generación de DA	Arsénico 0.4 a 1.5 mg/L
Zimapán, Hidalgo ⁶	pH ácido en algunas zonas de liberación de arsénico a partir de la oxidación de sulfuros como la arsenopirita	Arsénico hasta 0.53 mg/L

3. MARCO REGULATORIO PARA EL MANEJO DE RESIDUOS MINEROS

En México existe un conjunto de leyes y normas que regulan las actividades industriales, con el objetivo de preservar, y de ser posible, mejorar las condiciones ambientales en los lugares donde se asientan las industrias o que podrían sufrir efectos relacionados con ellas. En lo referente al manejo de residuos mineros, se han establecido algunas leyes y normas que regulan su manejo y disposición final, entre las que se encuentran la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEGEEPA), la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), las normas oficiales mexicanas NOM-141-SEMARNAT-2003, NOM-155-SEMARNAT-2007, NOM-159-SEMARNAT-2011 y la NOM-157-SEMARNAT-2009. Entre los aspectos que se regulan en estas normas se encuentra principalmente la caracterización de los residuos, así como estudios y requerimientos de proyectos, construcción y desarrollo de obras y actividades para el almacenamiento, además de criterios de monitoreo en la post operación.

3.1 Aspectos que marca la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente es el instrumento regulatorio de mayor jerarquía en México, referente al cuidado del ambiente y los ecosistemas. Es importante contemplarla para el establecimiento de especificaciones sobre las actividades de relleno de minas cuando se busca el cuidado ambiental. En su capítulo III del título primero se abordan los temas de la Política Ambiental en México y del aprovechamiento sustentable de los elementos naturales, especificando las actividades de exploración y explotación de los recursos no renovables, que en este caso se trata de los yacimientos minerales (Semarnat 1988).

3.1.1 Política Ambiental

Política Ambiental se refiere al conjunto de objetivos, principios, criterios y orientaciones generales para la protección del medio ambiente de una sociedad particular (Rodríguez, M. y Espinoza, G. 2002).

En el Artículo 15, la LEGEEPA establece los principios y los instrumentos de aplicación de esta política para garantizar el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales en donde se involucran las autoridades, las empresas y las comunidades. Entre estos principios cabe destacar a los que se mencionan en los incisos IV, V y VI, para que quienes afecten el ambiente asuman las responsabilidades y obligaciones que implica su afectación, o de otro modo, que cuando lo protegen sean incentivados y busquen aprovechar los recursos naturales de manera sustentable.

3.1.2 La disposición de residuos mineros

En lo referente a la disposición de residuos mineros, el Artículo 108 de la LEGEEPA menciona que para evitar y prevenir efectos ambientales por la explotación de recursos no renovables, la

Semarnat debe expedir normas oficiales mexicanas para la protección y control de la calidad del agua, suelos, flora y fauna, así como ubicar y colocar adecuadamente los desmontes y jales de las minas y que dichas normas deben ser observadas por los titulares de las concesiones, autorizaciones y permisos de las actividades mineras como se menciona en el Artículo 109. En la elaboración de una nueva norma oficial mexicana para relleno de minas se deben perseguir los objetivos establecidos y cumplir los requerimientos que se mencionan en estos artículos.

3.1.3 La autorización para la disposición de residuos mineros

Por otra parte, el Reglamento de la LGEEPA especifica en el Artículo 5, **los tipos de obras y actividades para la industria minera que requieren autorizaciones en materia de impacto ambiental, incluyendo en el inciso L, punto III al beneficio de minerales y disposición final de sus residuos en presas de jales, excluyendo las plantas que no utilicen sustancias consideradas como peligrosas y el relleno hidráulico de obras mineras.** Esto conduce a la necesidad de analizar este lineamiento, porque al ser el relleno una alternativa para disposición de residuos, se conoce que están sometidos a condiciones de intemperismo particulares de cada sitio que influyen en sus características de peligrosidad, por lo que se requiere evaluar todos los factores que influyen en el relleno de minas (condiciones de las obras, características de los residuos y presencia de agua), para garantizar el bienestar ambiental. De acuerdo a esta información se puede determinar que las actividades de relleno de minas con residuos mineros deberían también cubrir los requisitos de la autorización en materia de impacto ambiental.

3.2 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos

De acuerdo con la clasificación de generadores de residuos de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), los que son producidos por la industria minero-metalúrgica se consideran *residuos de manejo especial*, por ser generados en procesos productivos de grandes generadores y no reunir características de peligrosidad ni de los residuos sólidos urbanos (Semarnat 2003); esto es, siempre y cuando se encuentren en condiciones que garanticen su estabilidad y no les confieran ninguna característica de peligrosidad. En el título tercero, Artículo 19 se enlista la clasificación de los residuos de manejo especial que incluye a los residuos de las rocas o productos de su descomposición (Semarnat 2003).

3.2.1 Lineamientos generales para la disposición de residuos

La LGPGIR también establece en su Artículo 17 que los residuos de la industria minero-metalúrgica, provenientes del minado y tratamiento de minerales, incluyendo jales y residuos de los patios de lixiviación, pueden disponerse finalmente en el sitio de su generación; que su peligrosidad y manejo integral deben determinarse conforme a las normas oficiales mexicanas aplicables, y sujetarse a los planes de manejo previstos en esta Ley.

3.2.2 Aspectos que marca el Reglamento de la LGPGIR

El análisis del Artículo 17 de la LGPGIR conduce a la revisión del Artículo **34 del reglamento de la misma, donde se establece que los residuos mineros pueden disponerse finalmente en minas subterráneas como relleno conforme a las normas correspondientes que sean expedidas para tal efecto.** También se establece textualmente que **“Los generadores podrán disponer finalmente residuos mineros en minas subterráneas utilizando el proceso de relleno hidráulico o cualquier otro proceso, conforme a lo establecido en las normas oficiales mexicanas que para tal efecto expida la secretaría”** y que **“las normas oficiales mexicanas relativas a la disposición final de los residuos señalados en el presente artículo establecerán condiciones de construcción, operación, cierre, y en su caso, almacenamiento temporal que requieran los proyectos”** (Semarnat 2006).

El relleno de minas es una forma de disposición final de los residuos en los sitios de su generación, es frecuentemente practicado en las minas de todo el mundo y constituye una opción para brindar soporte a las obras subterráneas. Sin embargo, en México no existe una norma oficial mexicana que regule estas actividades, motivo por el que se requiere su expedición, y con ello, se cumpliría con lo establecido en el Artículo 17 de la LGPGIR.

En el Reglamento de la LGPGIR también se establecen criterios para elaborar los Planes de Manejo de los residuos provenientes de la industria minero-metalúrgica. En el Artículo 33 se señala que los responsables de la generación de residuos deben establecerlos, se mencionan los procedimientos para su registro y que los puntos que deben integrarlos son: el tipo y cantidad de residuos, planes de manejo integral, contemplando el aspecto ambiental, administrativo y la forma de verificación por parte de la Semarnat, la forma de aprovechamiento o valorización si son posibles, así como mecanismos de evaluación y mejora.

3.3 Normatividad en la disposición de residuos

Existen dos elementos que es necesario considerar para la expedición de una nueva norma en materia del uso de residuos mineros como relleno. El primero son las especificaciones para llevar a cabo el relleno de las obras subterráneas y el segundo es el manejo de los residuos que se contemplan. En lo referente al manejo de los residuos mineros, las normas existentes que regulan su manejo en México son la NOM-141-SEMARNAT-2003, la NOM-155-SEMARNAT-2007, la NOM-157-SEMARNAT-2009 y la NOM-159-SEMARNAT-2011.

3.3.1 NOM-141-SEMARNAT-2003

Las especificaciones de la norma oficial mexicana “NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales”; para la caracterización de jales, se consideran aplicables para los que son producidos por los procesos de flotación, lixiviación en tanques, concentración gravimétrica y

concentración magnética por las características de los residuos que han sido mencionados en el Capítulo 2 de esta tesis.

La caracterización de los residuos que se propone en esta norma, abarca métodos de muestreo y pruebas para determinar la peligrosidad de los jales, las cuales son: a) la prueba de extracción de los constituyentes tóxicos, y b) la prueba modificada de balance ácido base que se utiliza para determinar el potencial de generación de acidez (Semarnat 2004).

Otros aspectos importantes que trata esta norma son los requisitos para la obtención de las autorizaciones cuando se utilizan áreas naturales protegidas, cauces naturales, zonas federales, patrimonios históricos o culturales y áreas ocupadas por especies en riesgo para la disposición final de acuerdo con la caracterización de los sitios. Además se establecen especificaciones y criterios de preparación, proyecto, construcción, operación, post operación y monitoreo de las presas de jales, que como sitios de disposición final son totalmente diferentes a las obras subterráneas, sin embargo, es necesario analizar y evaluar que especificaciones y criterios podrían ser útiles para el relleno de minas.

3.3.2 NOM-155-SEMARNAT-2007 y NOM-159-SEMARNAT-2011

Para caracterizar el mineral gastado de los procesos de lixiviación y evaluar su posible uso como material de relleno, se podrían tomar como base las especificaciones que establecen las siguientes normas oficiales mexicanas:

- “NOM-155-SEMARNAT-2007, Requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de oro y plata”, especificaciones de preparación, construcción, operación cierre y monitoreo de los sistemas de lixiviación (en patios). Para la caracterización de los residuos se establece la forma de realizar el muestreo y análisis de los residuos (mineral gastado), así como las pruebas para determinar su peligrosidad que son de la *movilidad o extracción de constituyentes tóxicos* y la de *generación de drenaje ácido (DA)* o prueba *modificada de balance de ácido-base*. También se establecen las especificaciones de caracterización de los sitios para ubicar los sistemas de lixiviación, la magnitud de riesgos físicos y criterios de proyecto, preparación, obra, construcción, operación, eliminación de toxicidad (para cumplir la función de depósito de residuos), cierre y monitoreo para los patios de lixiviación (Semarnat 2010). En esta norma no se toma en cuenta que una cantidad importante de los residuos de los sistemas de lixiviación de oro y plata se conforma por jales cianurados y que su disposición final se realiza en presas de jales como los que son provenientes de los sistemas de flotación, por lo que se requiere también un análisis y propuesta de consideraciones y criterios para llevar a cabo su disposición final como relleno de minas.
- “NOM-159-SEMARNAT-2011 Que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre”. Las especificaciones para identificar la peligrosidad de los residuos de los procesos de lixiviación de cobre que se lleva a cabo en patios o terreros, incluyen la caracterización del mineral gastado, que abarca muestreo, pruebas de

concentraciones totales (base seca), de movilidad o extracción de los constituyentes tóxicos y de generación de DA. También se integran los estudios para la caracterización de los sitios, criterios de preparación, obra, proyecto, construcción, operación, supervisión, control de calidad, cierre y monitoreo de los sistemas de lixiviación (Semarnat 2012).

3.3.3 NOM-157-SEMARNAT-2009, planes de manejo de residuos minero-metalúrgicos

Los planes de manejo de residuos mineros y metalúrgicos son establecidos por la LGPGIR como un instrumento de la política ambiental, para minimizar su generación y maximizar su valorización. En esta norma se establecen especificaciones para formularlos, los criterios a considerar para su elaboración, definir las etapas que deben cubrir y las formas de manejo.

Esta norma incluye en sus especificaciones una clasificación de los residuos mineros, y abarca todos los que son objeto de la presente tesis, establece el propósito de dichos planes donde se deben considerar aspectos administrativos, económicos, tecnológicos, ambientales y sociales; los elementos y procedimientos que se deben considerar en su formulación (contenido, objetivos, vigencia, programa de actividades, modalidades, descripción de los residuos en cuestión, estudios de línea base), y su manejo integral para describir los procesos para desarrollar las actividades de prevención, minimización y valorización entre las que se encuentran la reducción de la fuente, la valorización, el tratamiento, el almacenamiento y la disposición final, que también deberían considerarse al realizar actividades de relleno de minas; la descripción de los mecanismos de evaluación y mejora. También abarca la caracterización de residuos que incluyen muestreo y pruebas para determinar concentraciones totales (base seca), movilidad de metales y metaloides, potencial de generación de DA y pH de la disolución del residuo en agua. Además abarca los criterios que se deben considerar cuando se valoran los residuos para su almacenamiento y disposición final buscando evitar procesos de erosión eólica e hídrica, impedir la dispersión de DA, lixiviados y escurrimientos en el ambiente, asegurar aislamiento entre residuos y cuerpos de agua, y contar con sistemas de captación y canalización de agua pluvial de acuerdo con las necesidades de cada sistema de disposición de residuos en cuestión. También se integran el monitoreo y la restauración de las zonas de depósitos que van quedando fuera de operación (Semarnat 2011).

3.5 Criterios internacionales para el relleno de minas

Actualmente Canadá, Australia y Sudáfrica son los países impulsores del manejo de jales por contar con grandes números de minas activas y de instalaciones de almacenamiento. Estos países cuentan con varios documentos regulatorios para estas actividades, entre los que se encuentran manuales, documentos técnicos, actas de conferencia y libros de texto relacionados con aspectos de diseño, construcción, operación y cierre de instalaciones de jales. Sin embargo, al igual que en México, están dirigidos principalmente a presas de jales. A continuación se hace una breve descripción de estos documentos.

3.5.1 Canadá

- *A Guide to the Management of Tailings Facilities*, 1998.- Contiene recomendaciones para elaborar sistemas e instalaciones de manejo de jales, se enfoca en aspectos de seguridad y ambientales, integra temas de Política Ambiental, estabilidad, manejo de sólidos, manejo de agua, estructuras, estándares y requerimientos legislativos (MAC 1998).
- *Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities*.- Establece los principios de la Guía para la Gestión de Instalaciones de Jales que requieren las presas de jales para el cumplimiento de los estándares de las instalaciones establecidos por las compañías, las políticas ambientales, los requerimientos regulatorios y los compromisos (MAC 2011).
- *Environmental Code of Practice for Metal Mines*.- Establece recomendaciones para las herramientas de manejo ambiental, de aguas residuales y de residuos mineros, la prevención y control de emisiones al agua, aire y suelo.

En la fase de disposición de jales y tepetate, se toman en cuenta los resultados de la predicción de la calidad del agua, específicamente donde existe potencial de lixiviación de metales o DA. Las recomendaciones incluyen limitar la producción de tepetate o residuos con potenciales de generación de acidez o lixiviación de metales, prevención o limitación de la disponibilidad de oxígeno a los materiales con potenciales, colocación de residuos bajo una cubierta de agua, hielo o nieve, mezclar o estratificar material con potencial de generación de acidez con materiales neutralizantes, eliminar los materiales con potencial generador de acidez y de lixiviación de metales del resto de los residuos.

Cuando se seleccionan los lugares para el almacenamiento de residuos se deben considerar flujos de agua superficial y subterránea con sus potenciales de contaminación, esquemas y balances preliminares de manejo de agua, topografía, sitios de pilas de residuos existentes, usos existentes y posibles de la tierra y los recursos, incluyendo el uso de la cuenca receptora y la distancia con las poblaciones, condiciones ambientales, planes de colocación y almacenamiento volumen/capacidad. En el diseño preliminar de las estructuras de contención y de gestión del agua, se consideran los impactos potenciales en el área, aspectos estéticos del cierre de minas. Se busca predecir los efectos ambientales para diseñar los depósitos asociados. Para la disposición final de residuos y las instalaciones de manejo, también se toman en cuenta elementos como la estabilidad a largo plazo y la evaluación de subsidencia del relleno de minas (Environment Canada 2009).

- Otros documentos técnicos como *“Use of high-density paste backfill for safe disposal of copper/zinc mine tailings”*, señalan las ventajas del relleno de minas subterráneas, específicamente, relleno en pasta, frente a la disposición de jales en superficie, están enfocados principalmente en los aspectos ambientales, lo que los lleva a ser económicamente factibles y atractivos para las empresas mineras gracias al desarrollo de

secado y transporte, reconociendo como beneficios ambientales la reducción de la disponibilidad de agua, el alto grado de saturación en las pastas y la codisposición de residuos generadores de ácidos que son encapsulados dentro del relleno. Como características para los residuos se han contemplado: distribución granulométrica de las partículas, composición química (mineralogía, aglutinantes), propiedades reológicas o de flujo para determinar los métodos de colocación, la compactación, durabilidad y resistencia del relleno. A pesar de todo esto, el reto del uso de relleno es ofrecer una nueva alternativa a los problemas existentes de gestión de residuos (Yilmas, E. et al. 2011).

3.5.2 Australia

En Australia se realizan evaluaciones de impacto ambiental, sistemas de manejo ambiental, desempeño y monitoreo, riesgos, almacenamiento y disposición de residuos, contención de jales y manejo de agua. Entre los documentos sobre manejo de jales, se encuentran:

- *Tailings Containment 1995*.- Establece políticas reguladoras y proporciona directrices para el almacenamiento de jales. Destaca por incluir la producción de pastas y su colocación como relleno de obras subterráneas, menciona que los jales también pueden ser depositados con o sin tepetate y otros materiales (codisposición), y por apilamiento en seco.

Los criterios que deben ser considerados en el diseño de instalaciones para disposición de jales son la contención segura y estable, por medio de actividades como la gestión de los escurrimientos y minimización o control de la filtración. Se requiere demostrar que el método de colocación es el mejor y que se ha comparado con otros, el diseñador debe ser una persona calificada.

Los criterios de manejo de agua contemplan balances cuantitativos, instalaciones de decantación y recuperación de agua, gestión de reactivos considerando factores como cantidad de jales y concentraciones de reactivos, impactos potenciales sobre el medio ambiente, riesgos para las aguas superficiales y subterráneas, que pueden controlarse por medio de la reducción o eliminación de las concentraciones de reactivos presentes en los jales (Department of Economic Development 2015).

- *Strategic Framework for Tailings Management, 2003*.- Se centra en la administración, la participación de las partes interesadas, la gestión de riesgos, la implementación y los aspectos de cierre del almacenamiento de jales. El documento pretende complementar las regulaciones de jales y otros manuales de orientación y establecer el aporte normativo e industrial para desarrollar directrices más consistentes para el almacenamiento de residuos.
- *Tailings storage facilities in Western Australia*.- Es un código de prácticas para cumplir con las normas requeridas por la legislación. Establece que la función principal de una instalación de disposición de jales es el almacenamiento seguro y económico en una

estructura resistente a la erosión y no contaminante que minimice los impactos ambientales, en función de cada sitio, mineralogía, proceso de beneficio, y topografía. Para la selección del sitio se deben considerar factores físicos: topografía, hidrología, tipos de materiales de cimentación y construcción (licuefacción, resistencia, solubilidad, disponibilidad), clima, geología, geomorfología, hidrogeología, métodos de construcción, asentamientos cercanos, obras subterráneas, colocación de jales (aérea o subaérea), forma de colocación, manejo de agua, usos de la tierra actuales y finales, requisitos de cierre (Department of Mines and Petroleum 2013).

- *Code of Practice. Ground control for underground mines* (Safe Work Australia 2011).- Es un documento técnico para lograr los estándares de salud, seguridad y cumplimiento de los reglamentos. En este código se consideran los aspectos geotécnicos de control de tierra, identificación de peligros y control de riesgos, movimientos e inundaciones en minas subterráneas. De acuerdo con este documento, una serie de características geotécnicas que deben ser definidos y cuantificados porque determinan efectivamente el movimiento de tierras y comportamiento son:
 - Estructura geológica
 - Esfuerzos de la roca
 - Propiedades de ingeniería del macizo rocoso
 - Agua subterránea

La implementación de planes de manejo efectivos resulta en la seguridad de las instalaciones de almacenamiento de jales y en la reducción de costos asociados a las actividades de operación y cierre de minas (Department of Minerals and Energy 1998).

3.5.3 Sudáfrica

- *Code of Practice for Mine Residue Deposits* 1998. La norma denominada SABS 0286: 1998 (más tarde renombrada a SANS 10286), establece los principios y requisitos mínimos de las mejores prácticas, todos encaminados a garantizar que no queden riesgos, problemas y/o legados ambientales para las generaciones futuras. La norma no aborda los problemas ambientales, de salud y seguridad, pone mayor énfasis en la necesidad de manejo a lo largo del ciclo de vida de las instalaciones de manejo de jales (South African Bureau of Standards 1998). Los temas que aborda son:
 - ✓ Manejo continuo
 - ✓ Minimización de residuos y de sus impactos
 - ✓ Principio de prevención de riesgos
 - ✓ Internalización de costos. Los costos totales deben satisfacer los requisitos de la norma sin descuidar la seguridad, la salud o el medio ambiente
 - ✓ Evaluación de las implicaciones del ciclo de vida completo resaltando la disposición de residuos. Debe considerarse en el contexto de todo el proceso

minero, y la necesidad de rehabilitar para el uso sustentable de la tierra después de que haya cesado.

4. CONCEPTOS GENERALES DEL RELLENO DE MINAS

El relleno de minas se refiere a las actividades que se realizan y a los materiales que se utilizan para ocupar un espacio o hueco creado por las excavaciones de una mina. Desde un punto de vista ambiental, es considerado como una alternativa para la disposición final de los residuos.

En la mayoría de las operaciones mineras, los materiales que se utilizan como relleno son jales y roca estéril o tepetate (Hustrulid, W. y Bullock, R. 2001), cuando alguno de ellos no se encuentra disponible, las necesidades de relleno de minas se cubren con el uso de otros materiales estériles que provienen de sitios externos cercanos a la mina. Estos materiales incluyen agregados pétreos de diferente tipo: a) naturales (arenas y rocas aluviales); b) de trituración (rocas de cantera), c) residuos de procesos metalúrgicos de fundición (por ejemplo, escorias).

El tepetate, los jales y el mineral gastado de los procesos de lixiviación constituyen parte de los residuos sólidos generados en las unidades mineras, por lo que se busca establecer criterios para su disposición final como relleno de minas subterráneas, con el afán de aprovechar los beneficios que estas prácticas conllevan, en relación con cada tipo de materiales utilizados, con los tipos de relleno seleccionado y con las características presentes en cada uno de los sitios de disposición, sin que ello represente un riesgo que comprometa la calidad del agua subterránea de las zonas mineras.

Al seleccionar los materiales utilizados como relleno deben considerarse criterios basados en la disponibilidad, cantidad requerida, costos de tratamiento, costos de colocación, costos operativos, capital disponible, resistencia física requerida, resistencia química bajo condiciones de confinamiento y a lo largo del periodo de transporte y colocación, condiciones geomecánicas y geoquímicas de la zona a rellenar, método de minado, configuración de la mina, técnicas de colocación, propiedades de ingeniería y permanencia cuando se utiliza como método de soporte (Grice, T. 2014); todos estos criterios se relacionan directamente con aspectos de seguridad, ambientales y económicos que deben ser evaluados.

4.1 El relleno en las minas subterráneas

En las minas subterráneas, las actividades de relleno se realizan después de que el mineral que ocupaba el espacio ha sido rezagado o extraído del rebaje (López, V. 2008).

Las funciones operativas y de seguridad del relleno de minas pueden variar de acuerdo con las necesidades de cada lugar, entre ellas se encuentran las siguientes (Choudhary, B. y Kumar, S. 2013; European Commission 2009):

- Disposición de jales y tepetate.- Permite reducir la cantidad de residuos dispuestos en presas de jales que provocan alteraciones en el ciclo hidrológico, principalmente de cuerpos de agua superficiales, alteran el paisaje y los ecosistemas
- Relleno de obras para cumplir con los estándares dimensionales establecidos en cada mina de acuerdo con la calidad de roca presente

- Método de soporte, que permite obtener la máxima recuperación de los minerales de interés, realizar las actividades operativas bajo condiciones de seguridad y realizar la extracción selectiva de los depósitos minerales
- Control de subsidencia superficial y subterránea, en relación con la distribución de cargas
- Control de movimientos del terreno y de caídos de roca
- Plataforma de trabajo en algunos métodos de minado
- Barrera de ventilación o para evitar el acceso de personal y equipo

Estas son las funciones que tiene el relleno desde el punto de vista operativo y de seguridad, pero es necesario también realizar un análisis de la influencia que pueden tener estos materiales sobre la calidad del agua subterránea que hay en las minas, que desde un punto de vista ambiental requiere ser evaluada.

4.1.1 El relleno como parte del método de minado

El relleno de obras subterráneas forma parte fundamental de algunos métodos de minado, lo que conduce a la posibilidad de realizar actividades que requieren continuidad, seguridad y por supuesto, ser económicamente factibles y rentables.

Entre los métodos de minado subterráneo que han utilizado relleno como método de soporte se encuentran (European Commission 2009; Masniyom, M. 2009; MiningInfo 2017; Hustrulid, W. y Bullock, R. 2001; Hartman, H. y Mutmansky, J. 2002).

- Corte y relleno
- Cuadros conjugados
- Frentes largas
- Tumbes sobre carga
- Tumbes por subniveles con barrenación larga
- Subniveles con rebajes abiertos y pilares
- “Undercut and fill” con relleno en pasta
- Cuartos y pilares.

Estos métodos pueden ser combinados con algún otro y utilizar relleno de acuerdo con las necesidades de cada mina. Aunque actualmente, el relleno se ha adoptado como un sistema de disposición de residuos, después de que los rebajes se han agotado, sin precisamente formar parte del método de minado.

4.1.2 El relleno como elemento de soporte

El relleno proporciona soporte a los pilares y a las paredes de las obras, lo que permite reducir los esfuerzos del macizo rocoso, los caídos de roca y el daño del terreno dentro de la mina. Esto permite mejorar las condiciones de las operaciones y la seguridad.

Diversos autores como Martson (1930), Aubertin et al. (2003) y Terzaghi (1943), citados en Belem, T. y Benzaazoua, M. (2004), han establecido parámetros y modelos matemáticos para el diseño del

relleno de minas cuando se contempla como método de soporte. Entre los modelos que han contemplado se encuentran la presión horizontal en las paredes laterales de los rebajes con relleno, la rigidez y la resistencia requerida para el relleno, que dependen de parámetros como:

- Peso unitario del relleno
- Peso total del relleno
- Dimensiones de las obras
- Coeficientes de fricción y deslizamiento entre las obras y el relleno
- Ángulos de fricción
- Presión vertical
- Coeficiente de presión del terreno
- Módulo elástico del macizo rocoso o los pilares,
- La variación en la longitud de los estratos

La resistencia del relleno depende de la función que se le asigna. Si se requiere como elemento de soporte, cuando la resistencia uniaxial compresiva de la roca circundante se encuentra entre 5 y 240 MPa, la resistencia compresiva uniaxial no confinada necesaria para el relleno es de por lo menos 5 MPa, mientras que para otras aplicaciones puede ser menor a 1 MPa.

Soporte vertical del relleno. Algunos autores citados por Belem, T. y Benzaazoua, M. (2004), sostienen que el relleno no es capaz de soportar el total del peso de las cargas superiores, y actúa solamente como un sistema secundario de soporte, a menos que haya ocurrido la subsidencia y la compactación de las capas que se encuentran por encima del material de relleno (López, V. 1994). La rigidez del relleno puede variar desde 1.0 hasta 1.2 GPa, mientras que la rigidez del macizo rocoso circundante puede ir desde los 20 hasta los 100 GPa.

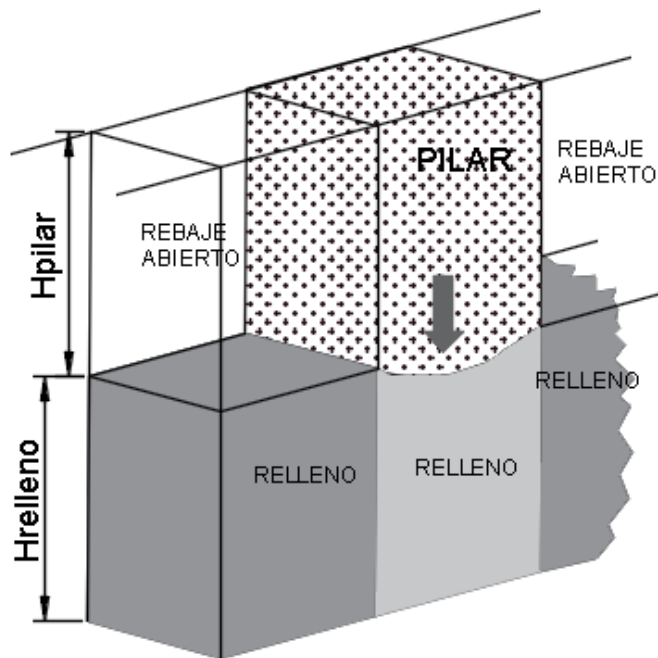


Figura 2. Representación esquemática de las cargas verticales de un pilar en la masa de relleno (Belem, T. y Benzaazoua, M. 2004).

Soporte del terreno. Después de que la resistencia pasiva se ha movilizó por el terreno, la resistencia incrementa en los pilares circundantes y podría ser igual a la magnitud de la resistencia pasiva del relleno. De este modo, el principal efecto estabilizante es el de incrementar la presión lateral confinada a los pilares.

4.2 Características de los materiales empleados como relleno

Los materiales que son empleados como relleno de minas poseen características que les aportan la naturaleza y los procesos de beneficio, algunas de ellas pueden modificarse de acuerdo con las necesidades para el diseño de las propiedades que se busca que posean como material de relleno y que se deben mantener para las etapas posteriores al cierre de minas. Algunas de las que más se estudian para la caracterización de jales y tepetate, de acuerdo con la European Commission (2009) son:

- Cantidad de producción
- Mineralogía
- Propiedades químicas
- Propiedades físicas y de ingeniería (estabilidad/plasticidad/resistencia)
- Potencial de generación de acidez
- Cambios en sus características físicas y químicas producidos por los procesos de extracción y beneficio a los que son sometidos
- Registro de minerales de baja ley, cantidad de roca estéril
- Pruebas cinéticas

- Distribución del tamaño de partícula

Para el diseño y manejo de residuos como relleno se deben sumar otras características como:

- Densidad de pulpa (% se sólidos)
- Densidad de sólidos
- Química de la fase líquida
- Características geoquímicas (contenido de metales, comportamiento de lixiviación)
- Agua de poro
- Comportamiento de consolidación,
- Características del procesamiento de minerales
 - ✓ Reactivos usados, concentraciones y cantidades,
 - ✓ Requerimientos de recirculación de agua
 - ✓ Procesos de tratamiento de la planta de concentración (destrucción de cianuro/lavado de material estéril de los procesos de lixiviación)
 - ✓ Otras fuentes de jales
 - ✓ Bombas y estructuras asociadas
 - ✓ Potencial para ser usado como relleno
 - ✓ Velocidad del manejo de jales de superficie a relleno.

4.2.1 Tepetate

En las minas subterráneas las cantidades de tepetate producido por las obras de desarrollo son relativamente pequeñas y dependen del grado de mecanización. El uso de tepetate como relleno facilita la extracción del mineral de interés, reduce la necesidad de sacar el material estéril a superficie, lo que minimiza la huella ecológica, y podría resultar rentable (European Commission 2009).

El tepetate para ser empleado como relleno se prepara con trituración, clasificación y mezcla con fuerza mecánica, por lo que no se encuentra sometido a alteraciones químicas, solamente a cambios en su granulometría. Algunos de los problemas más importantes asociados al manejo de tepetate son que en las operaciones de metales base, algunas veces tiene potenciales de acidez, y en algunos casos es necesario manejar por separado la fracción generadora de drenaje ácido (DA), de la que no lo es. Debido a que la permanencia subterránea del tepetate es mayor que la vida operativa de la mina, puede requerir monitoreo y mantenimiento para el cuidado de las condiciones de estabilidad física y química.

El relleno con tepetate se puede implementar en las minas donde hay disponibilidad de ese material y donde no existe tiempo de espera para realizar el siguiente corte superior en algunos métodos de minado.

4.2.2 Jales

Los procesos de reducción de tamaño y concentración primaria que se aplican a los minerales, les proporcionan cambios en algunas características tanto físicas como químicas, por ejemplo: el tamaño de partícula, contenido de partículas finas, área superficial, densidad de pulpa o porcentajes de sólidos, contenidos de reactivos, pH, potenciales de generación de DA y de movilización de EPT, propiedades superficiales y formas de partícula. Estas características, en combinación con las condiciones del sitio de disposición final, determinan el intemperismo y comportamiento mecánico de los jales, por lo que resultan de utilidad para seleccionar los métodos de manejo.

En general, los concentrados constituyen un 10% del mineral procesado, lo que significa que el 90% se convierte en jales, de los cuales, el 50% se usa para relleno por cuestiones de volumen, debido a que los procesos de fragmentación del mineral ocasionan un considerable incremento de aproximadamente 60%, por lo que la cantidad de jales disponibles muchas veces es mayor a la que se requiere para rellenar las obras subterráneas (European Commission 2009).

Tabla 6. Efectos de las características de los jales en las propiedades de ingeniería, seguridad y ambiente, atribuibles al comportamiento del relleno (European Commission 2009).

Comportamiento jales/Características jales	Distribución tamaño de grano	Finos	Superficie específica	% sólidos	Reactivos	pH	Influencia DA	Propiedades superficiales	Forma de partícula
Permeabilidad	X	X	X	-	-	-	-	X	X
Plasticidad	X	X	X	-	-	-	-	-	X
Resistencia al corte	X	X	X	-	-	-	-	X	X
Compresibilidad	X	X	X	-	-	-	-	X	X
Tendencia a la licuefacción	X	X	X	X	-	-	-	X	X
Propiedades químicas	-	X ¹	X ¹	-	X	X	X	X	X
Densidad (<i>In situ</i> y relativa)	X	X	X	-	-	-	-	X	X
Consolidación	X	X	X	-	-	-	-	X	X
Polvos	X	X	-	X	-	-	-	-	-
Toxicidad de descarga	X ²	-	X ²	-	X ²	X	X	X	-
Entrega de jales	X	X	-	X	-	-	X	-	-
Disposición	X	X	-	X	-	-	X	-	-
Manejo de agua libre	X	X	-	X	X ³	X	X	-	-
Flujo de infiltración	X	X	X	X	-	-	-	X	X
Seguridad a largo plazo	X	X	X	-	-	-	-	X	X
Manejo de DA	X	X	X	-	-	X	X	X	-
Emisiones al aire	X	X	-	X	-	-	-	-	-
Emisiones al agua	X	X	-	X	X ³	X	X	X	-
Emisiones al suelo	X	X	-	X	X ³	-	X	-	-
Tratamiento de efluentes	X	X	X	X	X ³	X	X	X	X
Construcción de Presas	X	X	X	X	X ³	X	X	X	X
Monitoreo	-	X	-	-	X ³	X	X	-	-
Cierre y cuidado	X	X	X	X	X ³	X	X	X	X

posterior

- 1) Debido al incremento de disponibilidad y alteración
 - 2) Si los jales expuestos a la atmósfera producen DA
 - 3) No necesariamente es válido si el agua de los jales es eliminada (por ejemplo, por filtración), antes de la descarga de los jales.
-

4.3 Aspectos técnicos del relleno de minas

Diversos autores como Sivakugan, N. et al. (2006) y Yao, Y. et al. (2012) clasifican los tipos de relleno tomando en cuenta diferentes características como contenidos de agentes aglutinantes y agua, así como los métodos de colocación. De acuerdo con el contenido de aglutinantes, el relleno puede ser cementado o no cementado, mientras que en función del contenido de agua puede ser seco, hidráulico o en pasta; y con base en el método de colocación, puede clasificarse como seco, relleno de gravedad, manual, mecánico, neumático, hidráulico y en pasta.

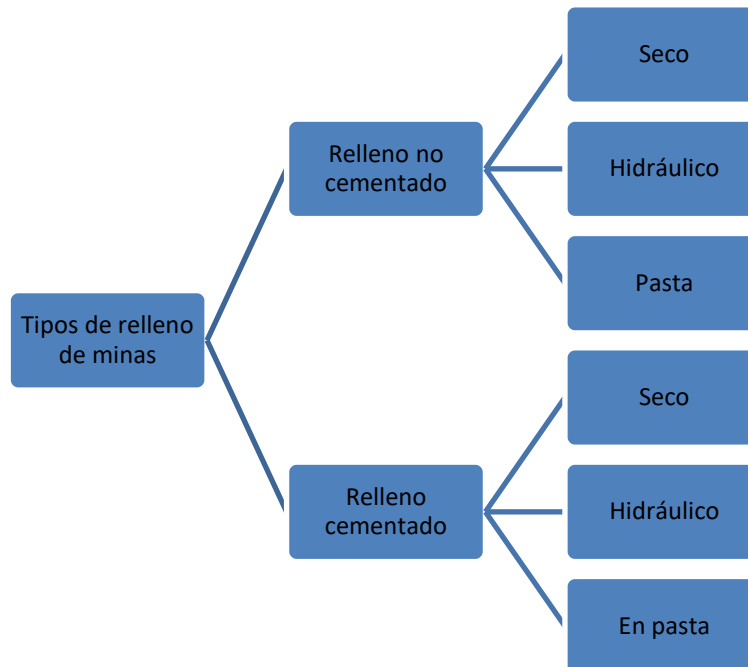


Figura 4.3. Tipos de relleno.

Las características del relleno no cementado pueden determinarse con la ayuda de teorías de mecánica de suelos (Sivakugan, N. et al. 2006). Por el contrario, el relleno cementado hace uso de porcentajes variables de agentes aglutinantes combinados con materiales puzolánicos⁴ de acuerdo con los requerimientos y especificaciones de cada tipo de relleno, lo que les aporta propiedades reológicas que se aprovechan en su transporte y colocación, así como las características físicas y químicas de diseño para cada lugar.

⁴ Materia esencialmente silicosa que finamente dividida no posee ninguna propiedad hidráulica, pero posee constituyentes (sílice - alúmina) capaces, a la temperatura ordinaria, de fijar el hidróxido de cal para dar compuestos estables con propiedades hidráulicas (Salazar, A. 2017).

En los últimos años, los tipos de relleno que se han utilizado comúnmente son el relleno seco y el relleno hidráulico, además de que se está implementando el relleno en pasta. El uso de estos tipos de relleno con adición de aglutinantes es cada vez más común por razones de seguridad, ambientales y de economía. Esto se da porque cuando se utilizan materiales como el cemento, se puede incrementar la resistencia de los materiales para brindar soporte en las obras mineras lo que permite trabajar con mayor seguridad y poder obtener mayores recuperaciones de los minerales de interés; además, la utilización de materiales que se consideran residuos permite minimizar los impactos ambientales en superficie, y los que pudiesen presentarse subterráneamente pueden ser controlados con técnicas como aislamiento, compactación, “colocación estratégica” y neutralización, lo que conduce a la reducción de costos posteriores al cierre por mantenimiento, tratamiento y monitoreo; finalmente, si a todas estas razones se suma el hecho de que todos los costos son calculados de manera adecuada, el uso de relleno cementado con residuos mineros puede resultar un método de disposición final rentable. En los Incisos 4.3.1, 4.3.2 y 4.3.3 se hace un breve resumen de las características y especificaciones de estos tipos de relleno.

En los casos donde se utiliza cemento, los métodos de colocación involucran la mezcla de los materiales en una tolva antes de colocarse en las obras, o en la percolación de una suspensión sobre los residuos después de haberse dispuesto. Las concentraciones de cemento y aglutinantes pueden variar de acuerdo con las necesidades del relleno. Estos tipos de relleno cementado se aplican en obras donde se requiere relleno estructural como es el caso del minado con rebajes abiertos y del que se realiza por medio de corte y relleno (European Commission 2009).

4.3.1 Características y especificaciones del relleno seco

El relleno seco generalmente se conforma de arenas no clasificadas, tepetate, jales o escorias de fundición que se transportan por gravedad o por medios mecánicos hacia las obras subterráneas a través de contrapozos, o que se llevan directamente desde superficie hasta las obras o a niveles de acarreo por medio de cargadores o camiones. A pesar del nombre, el relleno seco contiene generalmente algo de humedad superficial adsorbida, y puede ser cementado o no cementado (Hustrulid, W. y Bullock, R. 2001).

Este tipo de relleno es adecuado para los métodos de corte y relleno y otros donde no se requiere soporte estructural, por este motivo la única preocupación que podría contemplarse es la generación de DA y la liberación de EPT.

La resistencia del relleno con tepetate cementado es controlada por factores como el tamaño y angulosidad de las partículas, contenido de cemento, tipo y mineralogía de los residuos, técnicas de colocación y contenido de humedad (Hustrulid, W. y Bullock, R. 2001).

La resistencia requerida del relleno es función de la calidad de la roca, del método de minado en uso, de las dimensiones de las obras, y del ciclo de minado; se controla principalmente por la cantidad de cemento adicionado, sin embargo, puede estar influenciada por el propio peso del

relleno, el grado del efecto de arco entre el relleno y las obras, el daño producido por las voladuras, la abrasión o atrición de las rocas durante el transporte y por los movimientos del macizo rocoso.

Cuando se utiliza cemento, típicamente el contenido en este tipo de relleno varía de 4 a 8% en peso. La resistencia compresiva no confinada varía de 1 a 11 MPa y el módulo de deformación no confinado va de 300 a 1000 MPa. Varios estudios demuestran que la resistencia *in situ* puede llegar a ser hasta de un 50% de la que se mide en laboratorio y el tamaño de partículas puede estar en un rango de 150 mm a 200 mm (Hustrulid, W. y Bullock, R. 2001).

4.3.2 Características y especificaciones del relleno hidráulico

El relleno hidráulico se conforma de arenas limosas o limos arenosos, que pueden ser jales clasificados, arenas de trituración o arenas provenientes de otras fuentes que no contienen fracciones de arcillas; estos materiales se mezclan con agua y algunas veces con aglutinantes para formar lodos o suspensiones. Las arcillas se eliminan a través de un proceso de deslamado con el uso de hidrociclones para obtener mejor consolidación del relleno y mejorar el drenaje del agua. Esto conduce a que una cantidad de agua, aproximadamente del 30% del volumen inicial del relleno, sea drenada del rebaje con relleno (Choudhary, B. y Kumar, S. 2013).

La mayoría de las minas que utilizan relleno hidráulico alrededor del mundo, utilizan jales clasificados como material constitutivo principal, de los cuales se eliminan las partículas finas para obtener máximo un 8% en peso de partículas menores a 20 μm . Cuando se utilizan jales, se requieren análisis de su composición química y mineralogía debido a que algunos minerales de plomo, zinc y pirita, pueden afectar la reacción con los aglutinantes resultando en el retraso y reducción de la resistencia, así como en el deterioro a largo plazo. En muchos casos los jales contienen elementos y sustancias que a determinadas concentraciones pueden ser peligrosos, por ejemplo el arsénico y el cianuro, lo que requiere la revisión de los estándares locales para que sus concentraciones no afecten la salud, ni la seguridad de los trabajadores.

El relleno hidráulico tiene las siguientes propiedades: tamaños de partícula característicos de las arenas limosas, densidad de pulpa que varía de 55 a 75% de sólidos en peso (Choudhary, B. y Kumar, S. 2013), permeabilidad de los jales entre 10^{-5} y 10^{-6} m/s, porosidad de colocación de 50 a 30%, cuando es cementado posee alta resistencia compresiva para soporte estructural en las minas subterráneas (1 MPa para corte y relleno, y 5 a 7 MPa para recuperación de pilares). El cemento puede usarse en cantidades que superan el 16% para brindar máxima rigidez y existen dos mecanismos para la eliminación del agua que son filtración y decantación.

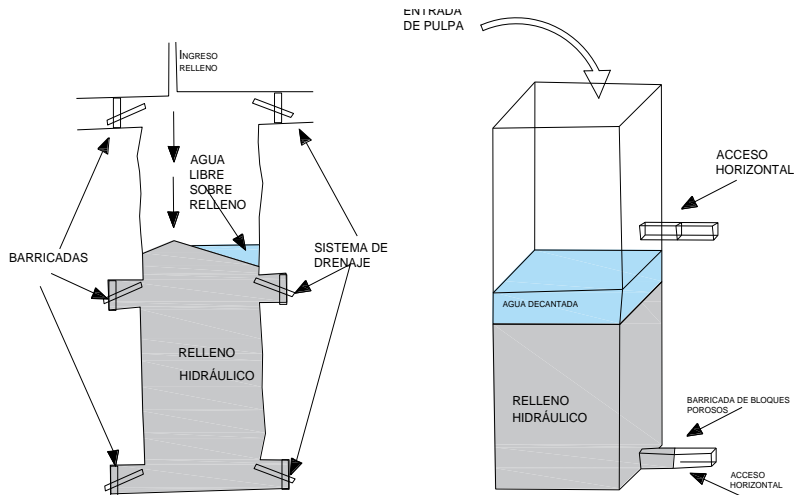


Figura 3. Ejemplos de relleno hidráulico en rebajes abiertos (Sheshpari, M. 2015).

Cuando se ha seleccionado la utilización de relleno hidráulico para obras subterráneas, es necesario tener presentes las siguientes consideraciones que de acuerdo con los requerimientos de las minas pueden ser tomadas como especificaciones (Sivakugan, N. et al. 2006):

- Drenaje: La permeabilidad se debe mantener por encima de un límite de 100 mm/h, aunque algunos autores recomiendan valores de 30 a 50 mm/h. Una mayor permeabilidad permite una rápida eliminación de agua aportando estabilidad al relleno que se encuentra contenido dentro de las obras. Con frecuencia, la permeabilidad que se mide en la mina resulta mayor que la que se mide en laboratorio.
- Estabilidad. La estabilidad del relleno hidráulico durante y después del drenaje depende de varios parámetros que determinan la resistencia y la rigidez de la masa de relleno, estos se relacionan directamente con la densidad relativa del relleno (2.8 a 4.4). Cuando el relleno es denso, el ángulo de fricción es alto, lo que hace al relleno más estable. Algunas mediciones *in situ* de minas muestran valores de densidades relativas de 44% a 66%. El relleno, por lo general, sedimenta con relaciones de vacío de 0.67 y 40% de porosidad.

Algunas especificaciones establecidas por Rojas, E. (2010) y Hustrulid, W. y Bullock, R. (2001), son:

- Porosidad
- Relación de vacíos de 0.6 a 0.9
- Grado de saturación
- Cohesión
- Fricción interna
- Densidad relativa
- Consolidación
- Compactación
- Cementación

- Compresibilidad.- Para el relleno hidráulico se presentan valores entre 8 y 10%.
- Gravedad específica 2.7 a 4.4
- Velocidad de percolación libre de aglutinantes mayor a los 2.5 cm/h
- Distribución de tamaños con un máximo de 8% menores a los 20 μm .
- Velocidad de percolación mayor a 10 cm/h para reducir potencial de licuefacción.

El relleno hidráulico se puede utilizar en minas donde hay disponibilidad de jales, con métodos de minado que tienen periodos cortos de tiempo para realizar los cortes superiores siguientes. Esto depende del tipo de sistema de drenaje usado en los rebajes a rellenar y de la cantidad de la movilidad de los materiales arenosos finos usados en el relleno (Brown, R. 2014).

El relleno hidráulico no consolidado se coloca en rebajes en los que no se contempla el cuele de obras enseguida o debajo; en algunos métodos de minado se utiliza como piso de trabajo en rebajes de bajo grado donde el mineral fragmentado se queda sobre él para evitar dilución durante la extracción del mineral (Hustrulid, W. y Bullock, R. 2001).

Las ventajas del relleno hidráulico, con respecto a otro tipo de relleno son, que es rápido de colocar, es eficaz en el llenado de las obras y es relativamente barato. Los materiales utilizados frecuentemente tienen componentes cementantes que les proporcionan estabilidad física y resistencia en algunas ocasiones. Sin embargo, también se presentan problemas en el ambiente al liberar volúmenes de agua que necesita ser drenada y se necesita instalar cantidades adicionales de relleno, se presenta baja resistencia y alta fluidez y hay que cuidar que no existan fallas y flujo en las regiones donde no se desea; se requiere un alto contenido de cemento/aglutinante para lograr una estabilidad relativa y resistencia moderada, lo que puede resultar costoso (Choudhary, B. y Kumar, S. 2013).

4.3.3. Características y especificaciones del relleno en pasta

El relleno en pasta es una mezcla de jales, aglutinantes y agua, en la que comúnmente, el porcentaje de sólidos varía de 70 a 85% en peso, la cantidad de agua contenida en los jales resulta de los procesos de espesamiento y filtrado a los que se someten y el contenido de aglutinantes se encuentra con proporciones entre 3 y 7% en peso total seco; finalmente se adiciona agua para lograr la consistencia deseada. La resistencia que desarrolla el relleno en pasta depende de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los jales, la química y cantidad de agua y del tipo y proporción de aglutinantes (Benzaazoua, M. et al. 2004; MAC 2006).

Existen tres categorías de distribución de tamaños de partícula para el diseño de relleno en pasta (Hustrulid, W. y Bullock, R. 2001):

- Jales gruesos. Contienen entre 15 y 35% en peso de partículas menores a 20 μm , rango de densidad de pulpa entre 78 y 85% en peso de sólidos, las proporciones agua/cemento y el alto contenido de sólidos proporcionan al relleno resistencias de al menos el doble de la que posee el relleno hidráulico.

- Jales medios. Contienen entre 35 y 60% en peso de partículas menores a los 20 μm , densidades de pulpa entre 70 y 78% en peso de sólidos, con estos materiales se producen pastas de buena consistencia pero de baja resistencia comparadas con las pastas de jales gruesos debido a la alta proporción agua/cemento.
- Jales finos. Contienen entre 60 y 90% en peso de partículas con tamaños menores a los 20 μm . El relleno con estos jales generalmente presenta alta retención de agua lo que proporciona características de flujo favorables para su transporte, pero cuya proporción agua/cemento podría ser adversa a la resistencia. Las densidades de pulpa varían de 50 a 70% en peso de sólidos.

Las pastas también se pueden clasificar en función de su contenido de aglutinantes en: pastas de jales espesos sin aglutinantes agregados y pastas de jales cementados. El segundo tipo se utiliza cuando se busca proporcionar soporte a las obras y cuando se requiere eficiencia en la velocidad de producción del relleno, porque en este caso no se requieren tiempos de clasificación y porque, los tiempos de fraguado son menores en comparación con el relleno hidráulico.

Algunos criterios de diseño estructural del relleno en pasta se atribuyen a su comportamiento mecánico, estabilidad, comportamiento ambiental y durabilidad; dependen de la permeabilidad del relleno, de la reactividad de los residuos y de la resistencia física. Las propiedades del relleno en pasta cementado tales como resistencia a la compresión y al corte dependen de factores como cohesión, ángulo de fricción interno y presión del agua de poro que son controlados por medio de la composición del relleno, es decir, porcentaje de sólidos, aglutinantes, contenido de agua, carga térmica debida a la hidratación o gradiente geotérmico, tiempo de curado, sobre carga y conductividad hidráulica.

Cuando se requiere utilizar como método de soporte requiere una resistencia uniaxial no confinada de por lo menos 5 MPa, mientras que para situaciones en las que no se requiere soporte comúnmente la resistencia es menor a 1 MPa. Algunos investigadores indican que esta resistencia uniaxial compresiva se encuentra entre 0.2 y 5 MPa dependiendo de la aplicación y cuando el macizo rocoso posee una resistencia uniaxial compresiva de 5 a 240 MPa (Sheshpari, M. 2015).

Frecuentemente el relleno en pasta contiene, por lo menos 15% de partículas finas menores a 20 μm , lo que permite mayor contención de agua en su superficie, por lo tanto, el drenaje no es una preocupación en este tipo de relleno (Sivakugan, N. et al. 2006). Estas partículas finas actúan como medio de transporte para las partículas gruesas. Esto además permite utilizar la totalidad de los jales provenientes de los procesos de concentración, incrementar los esfuerzos viscosos y la pasta se vuelve no-Newtoniana en la naturaleza, promoviendo condiciones de flujo similares a las de Bingham, es decir, presenta propiedades de fluidez y retiene suficiente agua coloidal, por lo que es adecuado para ser bombeado. Este carácter viscoso es una propiedad dinámica de la pasta, que como producto final tiene una proporción de huecos más baja que la de otros tipos de rellenos, lo que la hace más densa comparada con ellos.

Los métodos de caracterización del relleno en pasta incluyen las pruebas manuales para caracterización geoquímica de los residuos mineros como (MAC 2006):

- Análisis de conteo estático Ácido –Base (ABA)
- Análisis químico (por ejemplo del contenido de metales)
- Análisis mineralógico
- Pruebas de lixiviación a corto plazo

Pruebas cinéticas a largo plazo. Las características clave de los jales o de otros materiales que se evalúan para su aptitud como relleno de pasta son (MiningInfo 2017):

- Deshidratación del material
- La capacidad de bombeo
- Resistencia
- Densidad aparente

Al igual que en el relleno hidráulico, algunos minerales de plomo, zinc y piritita pueden afectar las reacciones con los aglutinantes, provocando afectaciones, retardos y disminución de la resistencia, por lo que se requiere la realización de pruebas y análisis de resistencia a corto y a largo plazo antes de que los materiales sean colocados como relleno (Hustrulid, W. y Bullock, R. 2001).

Cuando se utilizan jales piríticos con cemento se forman sulfatos, que también se encuentran en el agua residual de procesamiento de minerales, frecuentemente con 1.5 g por litro (Ercikdi, B. et al. 2009). Es importante cuantificar la cantidad de sulfatos presentes en las pastas debido a que son especies expansivas que afectan la resistencia del relleno.

En las minas modernas se deposita entre 40 y 100% del total de los jales en presas superficiales, el resto es colocado como relleno subterráneo, es decir, hasta un 60% (Benzaazoua, M. et al. 2004), lo que se refleja como un excelente método de disposición de jales y tepetate (Hustrulid, W. y Bullock, R. 2001).

De acuerdo con Benzaazoua, M. (2004), Ercikdi, B. et al. (2009), MiningInfo (2017) y Hustrulid, W. y Bullock, R. (2001), algunos parámetros y especificaciones que influyen en el comportamiento del relleno en pasta son:

- Permeabilidad
- Porosidad
- Peso porcentual sólido (porcentaje de sólidos en peso y en volumen)
- Resistencia uniaxial compresiva
- Resistencia al corte
- Proporción en peso de agua/cemento (w/c)
- Contenido de aglutinantes hidráulicos
- Contenido de partículas menores a 20 micrómetros
- Resistencia compresiva no confinada
- Resistencia de diseño

- Composición química de los jales (% de sulfuros, % de pirita)
- Distribución granulométrica (tamaño de partícula de los agregados)
- Gravedad específica
- Consistencia
- Masa volumétrica húmeda y seca
- Índice de vacíos
- Grado de saturación
- Porosidad
- Contenido volumétrico de agua
- Ángulo de fricción interna: de 20 a 35 grados para relleno consolidado
- Tiempo de curado
- Temperatura de curado
- Viscosidad.

5. AGUA SUBTERRÁNEA Y SU PRESENCIA EN LAS MINAS

5.1 Acuíferos

Del agua de las precipitaciones pluviales que alcanza la superficie del terreno, una parte circula sobre la misma y se conoce como escorrentía superficial, la cual se reúne en arroyos y más tarde desemboca en los ríos. Otra parte de la precipitación se infiltra en el terreno y es conocida como escorrentía subterránea, que dependiendo del tipo y permeabilidad del suelo y de la intensidad y duración de la precipitación, es capaz de recargar zonas saturadas de agua (que también proviene de acuíferos próximos, ríos u otros cuerpos de agua superficiales). Ambos tipos de escorrentía constituyen la escorrentía total, que va a confluir a los ríos y manantiales para terminar en lagos o en el mar, formando parte de las fuentes de abastecimiento de recursos hídricos para las poblaciones (López, J. et al. 2009).

El agua subterránea se desplaza a través de acuíferos y acuitardos. Un acuífero es un volumen subterráneo de roca y arena que contiene agua, se caracteriza por tener la suficiente porosidad y permeabilidad para permitir ya sea un flujo significativo de aguas subterráneas, o la extracción de cantidades económicas de ellas. Los acuíferos presentan dimensiones muy variadas, desde pocas hectáreas de superficie a miles de kilómetros cuadrados; y desde escasos metros de espesor a cientos o miles de metros (López, J. et al. 2009).

Los acuitardos son formaciones geológicas que transmiten el agua muy lentamente dificultando su extracción mediante captaciones en cantidades importantes. Sin embargo, este concepto no pierde importancia gracias a que estos cuerpos pueden intercambiar importantes cantidades de agua con acuíferos con los que pueden encontrarse en contacto (López, J. et al. 2009). Es por este motivo por el que al utilizar el término acuífero en la presente tesis se estarán abarcando ambos conceptos.

Los acuíferos se pueden clasificar en función de la presión hidrostática del agua contenida en ellos, de acuerdo con el tipo de materiales que lo constituyen y por su capacidad para almacenar agua que les aporta la porosidad de los materiales de la siguiente manera.

En función de la presión hidrostática del agua que contienen se encuentran (Werner, J. 1996):

- Acuíferos libres, no confinados o freáticos: Son aquellos en los que el nivel freático libre es su límite superior, porque no tienen una capa de roca impermeable en esa parte. Este límite hidrodinámico tiene variaciones temporales y el agua contenida se pone en contacto con el aire de la zona no saturada, por lo tanto, se encuentra a presión atmosférica.
- Acuíferos confinados: Son los que tienen lecho confinante formado por capas de roca con baja permeabilidad. Por lo general, el agua que contienen está a una presión superior a la atmosférica y cuando se perforan pozos en ellos, al atravesar sus techos, se observa un ascenso rápido del nivel del agua hasta estabilizarse en una determinada posición.

- Acuíferos semiconfinados o semicaútivos: En ellos el muro, el techo o ambos, son semipermeables y permiten la circulación vertical del agua y pueden recargarse o perder agua a través del techo o de la base. Este paso vertical de agua puede hacerse desde o hacia el acuitardo, o variar con el tiempo, según sean los valores relativos de los niveles piezométricos.
- *Acuíferos colgados*: Son un caso especial de los acuíferos libres; se presentan en estratos muy permeables de la zona no saturada donde hay pequeñas capas impermeables, en las cuales se acumula el agua.
- *Acuífero artesiano*: Un acuífero puede estar conformado por una zona no confinada con nivel freático libre y una zona confinada. En la parte donde la superficie del terreno descende debajo del nivel de presión, el acuífero confinado se convierte en un acuífero artésiano, es decir, las perforaciones que alcanzan al acuífero en esta zona se convierten en *pozos artesianos o surgentes*, de los cuales el agua subterránea brota libremente.

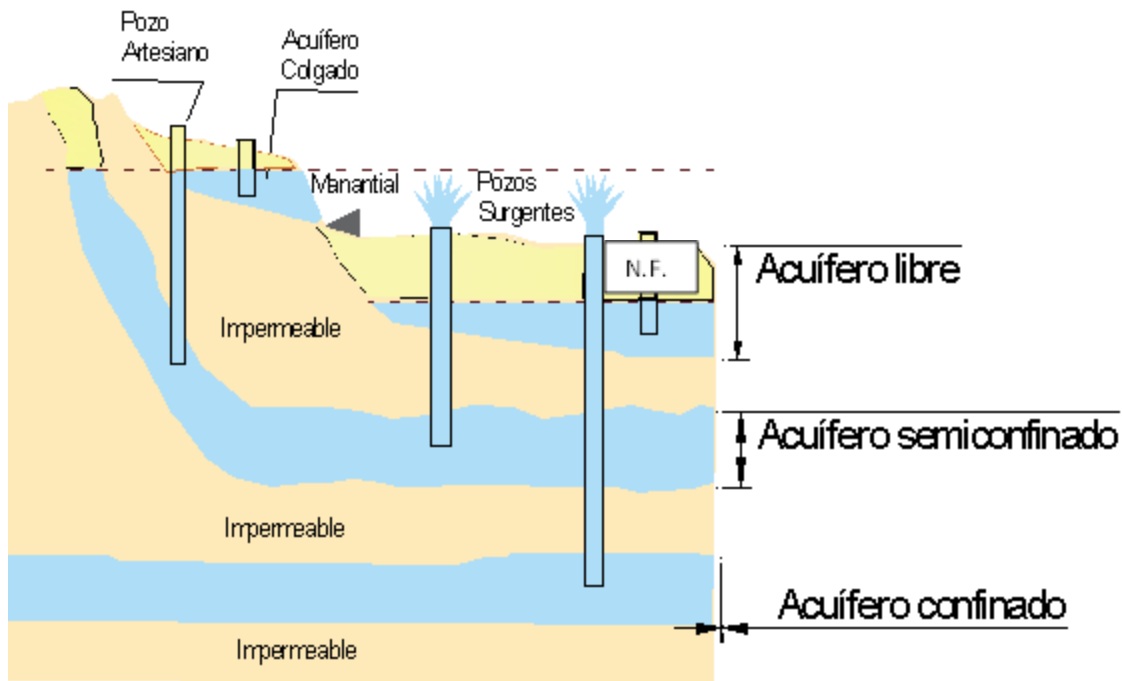


Figura 4. Esquema de los diferentes tipos de acuíferos de acuerdo con la presión hidrostática del agua contenida en ellos (Areacencias 2017).

En función de los materiales que los constituyen y de la capacidad que tienen para almacenar agua por efecto de su porosidad, los acuíferos se clasifican en (Werner, J. 1996):

- Acuíferos de poros, conformados por materiales sueltos que pueden ser arenas y gravas de distinto origen geológico.

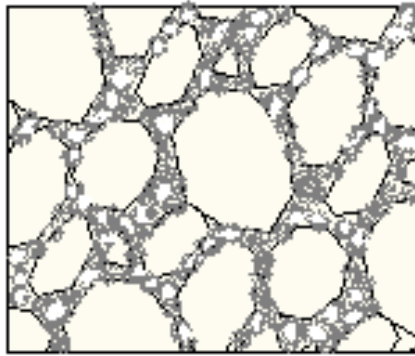


Figura 5. Acuífero de poros (Werner, J. 1996).

- Acuíferos de grietas, conformados por rocas consolidadas que permiten una apreciable circulación de agua.

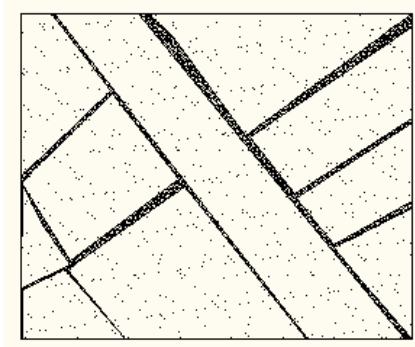


Figura 6. Acuífero de grietas (Werner, J. 1996).

- Acuíferos cársticos: Rocas carstificadas⁵ (por ejemplo: calizas, dolomías, yeso).

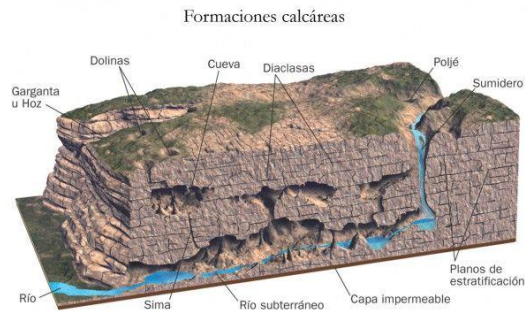


Figura 7. Acuífero Cárstico (Areacencias 2017).

5.1.1 Comportamiento de acuíferos

El movimiento del agua subterránea y el comportamiento de acuíferos están gobernados por principios hidráulicos establecidos por la Hidrogeología, que se ocupa de la cantidad y del flujo del

⁵ Carstificación se refiere al intemperismo químico de las rocas.

agua subterránea, por medio de leyes físicas, métodos para determinar los parámetros físicos y el establecimiento de modelos matemáticos (Werner, J. 1996). Conocer el comportamiento del agua subterránea es importante para llevar a cabo un aprovechamiento controlado y responsable de este recurso.

La dirección de flujo del agua subterránea se debe al potencial o carga hidráulica, que se refiere al nivel de agua en diversos puntos, de tal manera que el agua fluye del punto de mayor al de menor nivel. La facilidad o dificultad con que el agua se mueve a través del medio rocoso depende de la permeabilidad que se determina de acuerdo con la ley de Darcy.

Un sistema de flujo de agua subterránea comprende la recarga, el flujo horizontal y la descarga que corresponden al sistema hidrogeológico. Las funciones hidrogeológicas principales de un acuífero (Werner, J. 1996) y los parámetros que permiten caracterizar los movimientos del agua a través de ellos son:

- almacén de agua subterránea (parámetros: porosidad, contenido de agua y grado de saturación)
- conductor de agua subterránea (parámetros: permeabilidad, gradiente hidráulico conductividad hidráulica K)
- medio de intercambio geoquímico.

Para el establecimiento de estos parámetros se pueden emplear métodos a escala regional (mapas y cartografía), local (obras mineras), próxima y puntual (testigos de sondeos).

Porosidad

La capacidad del acuífero de almacenar agua, está determinada por su porosidad. Los poros de un acuífero pueden estar llenos de agua y aire en una zona no saturada, o solamente de agua en una zona saturada.

La porosidad n se refiere a la relación del volumen de vacíos entre el volumen total de roca y se representa por la Ecuación (5.1):

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \dots \dots \dots (5.1)$$

El tipo de roca que conforma el acuífero; la forma, distribución de tamaños y grado de compactación de las partículas, determinan el tipo de poros y la porosidad. Algunos valores típicos de porosidad en diferentes materiales se muestran en la Tabla 7:

Tabla 7. Valores típicos de porosidad que presentan algunos materiales (Baquero, J. 1998).

Materiales no consolidados	Porosidad (%)
Gravas	20-50
Arenas y gravas	25-30
Arenas	5-9-47
Aluviones recientes	5-15
Arenas graníticas	>13
Arcillas	44-50

Margas	47-50
Lodos recientes	80-90
Limos	34-50
MATERIALES CONSOLIDADOS	
Calizas	0.5-17
Cretas	14-44
Calizas oolíticas	3-50
Pizarras	1-10
Areniscas	4-25
Dolomías	>2.9
Granitos	0.02-1.5
Yesos	>4
MATERIALES NO CONSOLIDADOS	
Gravas	30-40
Arenas gruesas o gravosas	30-40
Arenas medias a finas	30-35
Limos	40-50
Arcillas	45-55
MATERIALES CONSOLIDADOS	
Calizas y dolomías	1-50
Areniscas medias o gruesas	<20
Areniscas finas	<10
Margas y Esquistos	<2

Contenido de agua y grado de saturación

Es la cantidad de agua que ocupa los poros del acuífero y puede expresarse con base en la masa del agua o en su volumen. En el primer caso, se define como la relación de la masa del agua entre la fracción sólida y se denomina contenido absoluto de agua (Ecuación 5.3):

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \dots \dots \dots (5.3)$$

Dónde:

W = contenido de agua en porcentaje

W_w = masa de agua contenida en los poros

W_s = masa de los sólidos

Gradiente hidráulico y potencial hidráulico

Al considerar los puntos a y b a lo largo de una corriente subterránea, con sus respectivos potenciales hidráulicos H_a y H_b , se dice que el gradiente hidráulico en la dirección a-b es la diferencia del potencial hidráulico del primer punto menos el del segundo, dividida entre la distancia que los separa:

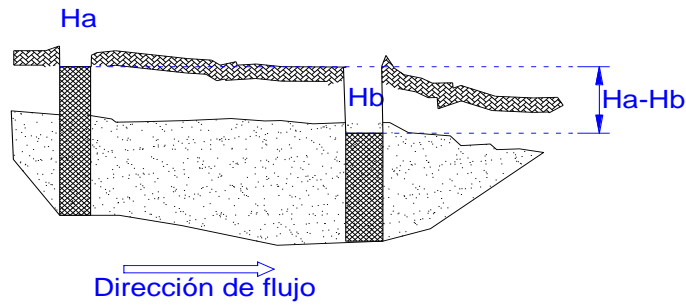


Figura 8. Dirección del flujo (Iturbe, R. y Silva, A. 1992).

El potencial hidráulico es la fuerza impulsora del flujo del agua subterránea. Cuando el fluido conserva el mismo potencial en diferentes puntos, no hay movimiento; cuando existe una diferencia de potencial, el agua fluye en la dirección en la que este disminuye, aunque la permeabilidad suele disminuir con la profundidad, debido a la compactación isostática del terreno y cierre de fracturas. Estos potenciales corresponden al nivel piezométrico o a la presión del agua en un punto y son consumidos por la fricción con las superficies del medio rocoso a través del que fluye el agua.

Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad K

Es la capacidad de un acuífero de conducir agua; y depende de la permeabilidad del material que conforma el acuífero y de las propiedades del fluido (por ejemplo, temperatura y viscosidad) (Werner, J. 1996). Se expresa como caudal de agua que atraviesa una sección de material, bajo la acción de un gradiente hidráulico unitario, a temperatura fija o determinada. Habitualmente se mide en m/día o cm/s.

El coeficiente de conductividad hidráulica K se obtiene de la ecuación de Darcy y se calcula con la Ecuación 5.8:

$$K = \frac{Q}{A(dh/dL)} \dots\dots\dots (5.8)$$

Experimentalmente K se determina para calcular la permeabilidad de un acuífero por medio de pruebas de laboratorio (por ejemplo: permeámetro vertical de carga constantes y prueba por consolidación) y de campo (por ejemplo: trazadores y pruebas de bombeo) (Iturbe, R. y Silva, A. 1992).

En el caso de materiales detríticos consolidados (conglomerados y areniscas), su permeabilidad se ve disminuida, en comparación con los respectivos materiales no consolidados (gravas y arenas).

Tabla 8. Valores típicos de permeabilidad horizontal (Baquero, J. 1998).

Materiales sedimentarios no consolidados	Tipo de estructura	Permeabilidad (m/día)
Gravas	Acuífero	$1 \cdot 10^2 - 8 \cdot 10^4$
Arenas gruesas o gravosas	Acuífero	$1 \cdot 10^0 - 1 \cdot 10^3$
Arenas medias a finas	Acuífero	$5 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^2$

Limos	Acuitardo	$5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-3}$
Arcillas	Acuitardo	$5 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-4}$
Materiales sedimentarios consolidados	Tipo de estructura	Permeabilidad (m/día)
Calizas y dolomías	Acuífero o acuitardo	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^5$
Areniscas gruesas o medias	Acuífero o acuitardo	$1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^3$
Areniscas finas	Acuífero o acuitardo	$5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-1}$
Margas y esquistos	Acuitardo o acuífero	$5 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-2}$
Rocas volcánicas	Tipo de estructura	Permeabilidad (m/día)
Basaltos	Acuífero o acuitardo	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^5$
Rocas volcánicas ácidas	Acuitardo o acuífero	$5 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^{-2}$
Rocas intrusivas	Tipo de estructura	Permeabilidad (m/día)
Plutones y rocas metamórficas	Acuitardo o acuífero	$5 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-1}$

Ley de Darcy

Darcy investigó el flujo de agua en lechos horizontales de arena y encontró que la velocidad del flujo a través de un medio poroso es directamente proporcional a la pérdida de carga (potencial hidráulico) e inversamente proporcional a la longitud que atraviesa el flujo. Esta relación se conoce como ley de Darcy (Ecuación 5.9).

$$Q = -KA \frac{dh}{dL} \dots \dots \dots (5.9)$$

Dónde:

K = coeficiente permeabilidad o de conductividad hidráulica (d/t)

dh/dL = gradiente hidráulico i

A = Área del tubo de flujo

La ley de Darcy se aplica a flujo laminar y no es válida cuando es flujo turbulento. La turbulencia o laminaridad dependen de la resistencia que el acuífero ofrece al flujo, que a su vez depende del tipo de rocas, del tamaño y forma de las partículas que lo constituyen, del grado de consolidación del medio rocoso (densidad, tamaño y geometría de los poros) y de la temperatura del agua que determina otras características como viscosidad y tensión superficial (Iturbe, R. y Silva, A. 1992).

Velocidad de flujo del agua subterránea

El flujo adquiere velocidades variables, que pueden ser tan lentas, del orden de escasos metros o pueden alcanzar varios centenares de metros al cabo del año. Los acuíferos kársticos pueden tomar velocidades similares a la de las corrientes superficiales (López, J. et al. 2009).

La velocidad de flujo a través de algunos acuíferos que se conforman de diferentes materiales tiene los rangos siguientes:

- Acuíferos de grava: 0.5 - 30 m/d
- Acuíferos de arena: 0.1 - 1.0 m/d

- Acuíferos de grietas y kársticos: 10 – 150 m/h
- Acuíferos profundos: pocos m/a.

5.2 Calidad del agua subterránea

La composición química del agua antes de las operaciones mineras y después de ellas puede cambiar, por lo que, en cada etapa debe hacerse una evaluación de su calidad. Para ello es necesario tomar en cuenta que de acuerdo con los materiales que se usan y las condiciones de las obras, como la mineralogía del macizo rocoso, la presencia de agua y oxígeno, después de cada actividad, se podrían presentar cambios en la composición del agua subterránea. El control de los factores que influyen en estos cambios permitiría asegurar que el agua que queda en la mina tendrá, por lo menos, la calidad que se encontró al iniciar operaciones.

Es necesario hacer pruebas del agua antes y después de las operaciones mineras, focalizando su calidad antes y después de su contacto con los materiales de relleno, para conocer el cambio en sus características dentro de la mina y en la zona influenciada del acuífero correspondiente a ella.

La calidad del agua subterránea se determina a través de las características fisicoquímicas y de los constituyentes que presenta (Instituto Geológico y Minero de España 2017). Los constituyentes químicos disueltos en el agua se clasifican de acuerdo con su frecuencia de aparición y valores de concentración decrecientes en:

- Constituyentes mayoritarios y fundamentales.- Aniones: $(\text{HCO}_3 + \text{CO}_4^{2-})$, Cl^- , SO_4^{2-} , $\text{CO}_3^{2-}\text{NO}_3^-$; cationes: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ ; otros: CO_2 , O_2 , SiO_4H_4 ó SiO_2
- Constituyentes minoritarios o secundarios.- Aniones: F^- , S^{2-} , SH^- , Br^- , I^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , BO_3^- ; cationes: Mn^{2+} , Fe^{2+} , Li^+ , Sr^{2+} , Zn^{2+}
- Constituyentes traza: Al^{3+} , Ti^{4+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{3+} , entre otros.

En el agua natural dulce, estos constituyentes aparecen por lo general en forma iónica (sales casi totalmente disociadas). Con menor frecuencia se presentan en forma molecular, parcialmente disociadas o como iones complejos de sustancias orgánicas o inorgánicas. Un constituyente minoritario puede alcanzar rangos de concentración que permitan clasificarlo como mayoritario.

Las características fisicoquímicas que presenta el agua, como consecuencia de su composición química y de efectos naturales externos, son: color, turbidez, sabor, temperatura, conductividad eléctrica, pH, alcalinidad, dureza⁶, demanda química de oxígeno (DQO)⁷ y demanda bioquímica de oxígeno (DBO)⁸.

⁶ Se refiere a la capacidad del agua para consumir jabón o producir incrustaciones, se define en términos de Ca y Mg y se expresa en términos de mg/L de CaCO_3

⁷ Es la capacidad del agua para consumir oxidantes en procesos químicos (materia orgánica oxidable, Fe^{2+} , Mn^{2+} , NH_4^+ , y otros)

⁸ Es la cantidad de oxígeno necesaria para eliminar por procesos biológicos aerobios la materia orgánica contenida en un agua.

La norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, titulada “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización” puede ser considerada como referencia para determinar la calidad del agua subterránea con base en sus constituyentes y parámetros. Sin embargo, esta norma no contempla en su totalidad a todos los constituyentes y parámetros que podrían derivarse de las actividades mineras, por lo que resulta recomendable analizar la mineralogía presente en la mina, los residuos mineros y la composición química del agua para determinar cuáles deberían ser analizados. Además, sería aconsejable identificar los aprovechamientos y el uso del agua que se encuentra aguas abajo de la zona minera, para determinar las concentraciones máximas permisibles de acuerdo a dichos usos.

5.3 Agua dentro de las minas

En las minas subterráneas se pueden diferenciar tres formas de flujo de agua. Estas son la percolación a través de fracturas y fisuras geológicas (porosidad secundaria), el agua que se infiltra a través de los poros de las rocas del macizo rocoso (porosidad primaria), y el flujo preferencial a lo largo de las obras mineras y que puede pasar entre los pilares o entre las paredes de rocas que la rodean.

El paso del agua dentro de una mina comienza por medio del flujo de aguas meteóricas a través de fracturas, fisuras y planos de estratificación que se localizan sobre el nivel freático, hasta alcanzarlo e incluso, rebasarlo. Es a partir de ese momento que el agua comienza a ponerse en contacto con el macizo rocoso, por lo que es necesario conocer sus características desde antes de que sean coladas las obras mineras que alteran las características estructurales del macizo rocoso, lo que permite comparar la calidad del agua que circula por la mina con la calidad del agua antes de iniciar las operaciones y poder evaluar las afectaciones que podrían originar.

La minería cambia las condiciones del agua subterránea provocando el descenso del nivel freático en la construcción de las obras, permitiendo la entrada de oxígeno en un ambiente que era antes reductor, lo cual ocurre por dos causas principales:

1. El agua fluye por gravedad hacia niveles inferiores a través de discontinuidades, ya sean naturales, o provocadas por las actividades mineras, como es el caso del fracturamiento producido por las voladuras en el contorno de las obras; el flujo del agua también puede descender a través de las obras mineras, por ejemplo, túneles para evacuar agua por gravedad, tiros, contrapozos, rampas y barrenos.
2. El bombeo para extracción de agua a superficie, también es un causante importante de dichas caídas del nivel freático.

El descenso del nivel freático de una zona y la entrada de oxígeno que promueven la oxidación de algunos minerales, son mayores en la proximidad de las obras debido a la fragmentación producida por las voladuras, a distancias que pueden variar desde dos hasta ocho metros

(Wolkersdorfer, C. 2006). Otros efectos producidos por el bombeo de agua y por el desagüe de las minas son cambios en el caudal de manantiales y en la dirección de flujo (Tovar, J. 2017).

Para comprender el flujo del agua en el interior de las minas subterráneas es importante conocer las características del medio a través del cual se mueve (que han sido descritas a lo largo del subtema 5.1), así como la ubicación de las obras con respecto a los acuíferos presentes en la zona de explotación. Rubio y Olmo (1995), proponen distinguir a la minería por encima o por debajo del nivel freático, desde un punto de vista hidrogeológico.

Es conveniente tener un enfoque sobre las obras subterráneas que se encuentran debajo de cuerpos de agua, del nivel freático, o que los intersectan en algún punto, porque es donde existe mayor incidencia en el agua, incluso a grandes distancias y porque son situaciones que se presentan en muchos casos alrededor del mundo (Younger, P. et al. 2002).

Para conceptualizar el flujo del agua en las minas subterráneas se puede partir del análisis de secciones transversales que contengan información sobre la geología del yacimiento, la morfología, dimensiones y características de los acuíferos, así como de la distribución de las obras mineras y sus dimensiones. La secuencia de minado también representa un factor importante para realizar un análisis de flujo, debido a que de esta puede depender la dirección y el caudal del movimiento del agua. Para brindar una idea general de los escenarios que se pueden presentar en una mina subterránea se presenta la Figura 9, a partir de la cual se puntualizan zonas para establecer hipotéticamente como sería el movimiento del agua en ella.

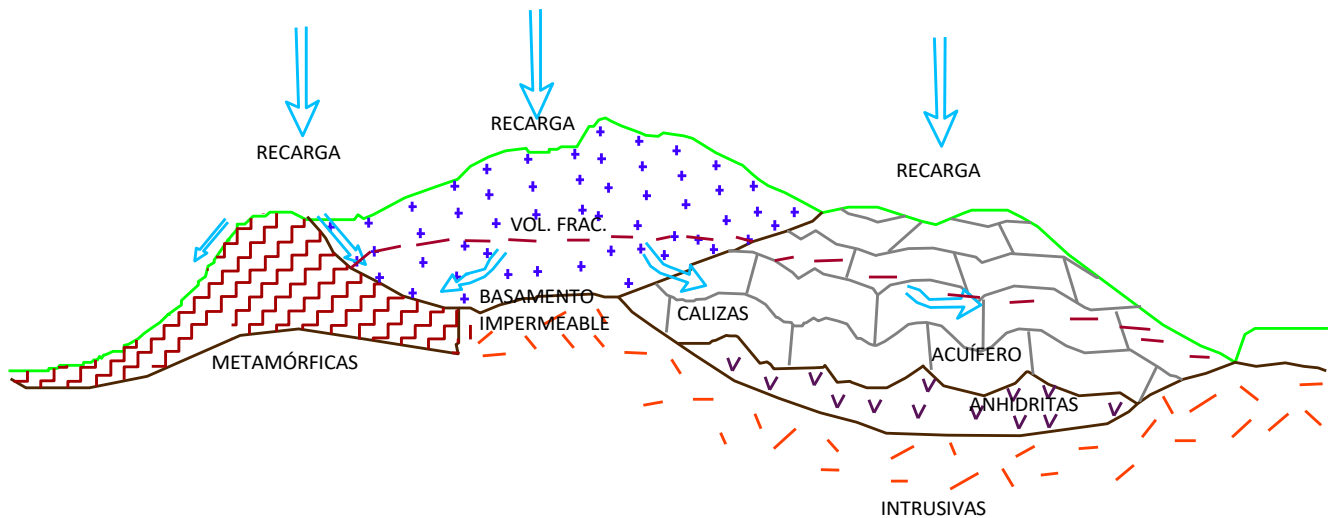


Figura 9. Flujo natural de agua en una zona sin minar.

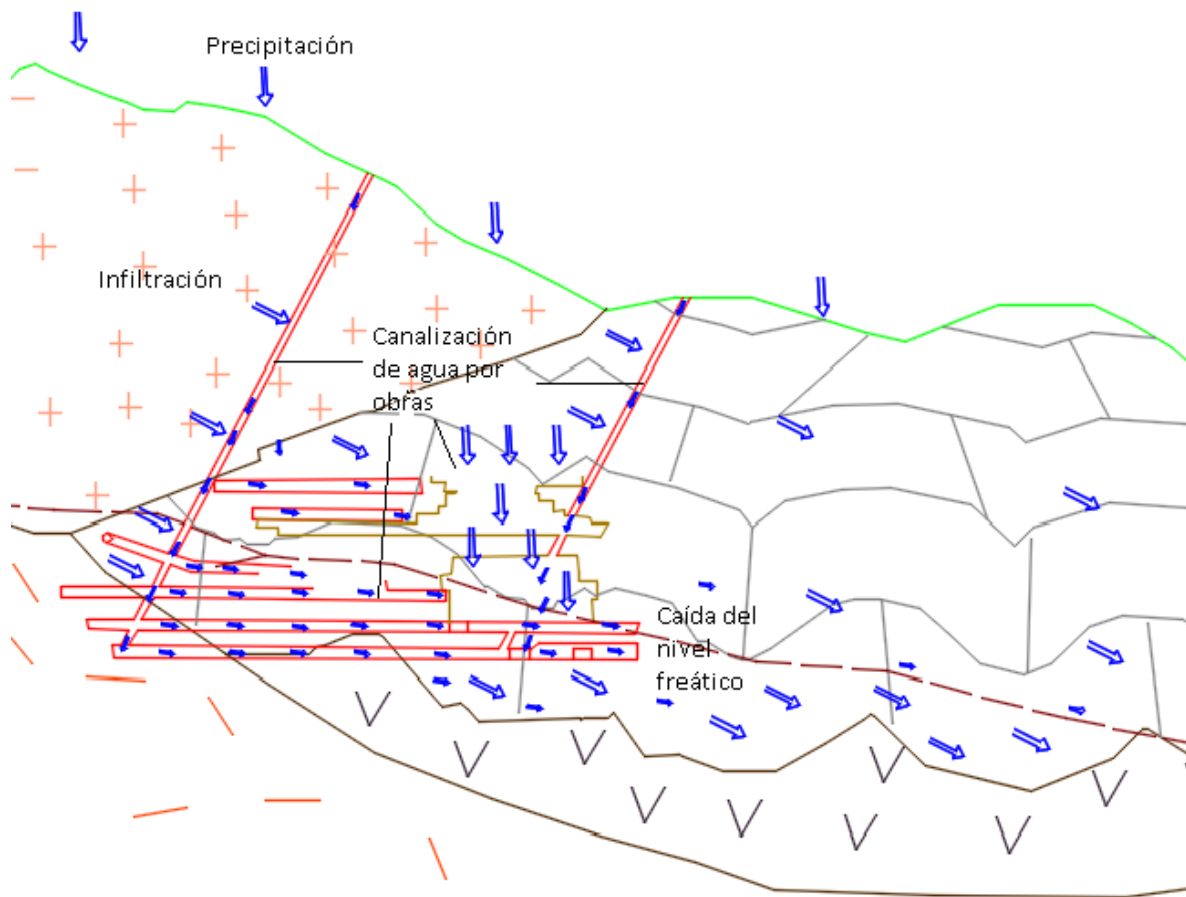


Figura 10. Alteración del flujo de agua y caída del nivel freático por efecto de la excavación de obras mineras.

En la Figura 10 se puede observar una zona con obras mineras que alteran el flujo natural del agua a través de un acuífero. Para comenzar el análisis se puede observar que desde los tiros, los escurrimientos superficiales pueden verse modificados, sirviendo como conductos de alta permeabilidad que llevan el agua hacia otras obras mineras con las que se encuentran conectados a medida que se van profundizando. Además las paredes de estas obras también son un medio receptor que permite un incremento en la cantidad de agua que es canalizada a través de ellos.

De acuerdo con la dirección de flujo natural del acuífero de la Figura 10, a medida que se avanza hacia la derecha, después de cada tiro, el caudal que conduce el acuífero podría verse reducido y esto se podría reflejar en una caída del nivel freático. Además, parte del agua podría seguir cayendo por gravedad a través de las obras y discontinuidades hasta alcanzar el nuevo nivel estático y/o continuar fluyendo lateralmente hacia otras obras, de donde puede ser bombeado hacia superficie. Sin embargo, es muy importante el estudio y el análisis de cada caso particular porque cada acuífero, sistema de minado y todas las minas son variables, incluso de acuerdo en cada zona que forme parte de ellas.

Las actividades de bombeo en las minas subterráneas se realizan para poder desaguar el agua de las obras, lo que permite llevar a cabo las operaciones; también se utiliza para extraer el agua y poder aprovecharla en otros usos como es el beneficio de minerales y el abastecimiento a los equipos empleados. Cuando el espesor de un acuífero es grande respecto a las obras, de manera que estas quedan coladas dentro de él, el agua entra a la mina por todas las paredes, lo que ocurre con el bombeo es que se crea un cono de abatimiento en el que el nivel estático de la zona de influencia de las obras se ve reducido. Cuando el acuífero tiene menor espesor que las obras y es cortado por ellas, el agua tiende a fluir al fondo de la mina, donde puede ser captada y bombeada hacia los sitios deseados.

En las minas subterráneas los efectos del agua pueden ser muy severos, principalmente cuando no se encuentran controladas las entradas de esta, llegando a causar el cierre de las operaciones debido a la inundación de las obras, lo que implica altos costos de recuperación y pérdidas de la producción.

Las operaciones de drenaje de minas pueden afectar al agua subterránea, por causa de cambios en su calidad, debidos a la producción de drenaje ácido (DA) con la subsecuente disolución de elementos potencialmente tóxicos (EPT), que son impactos que pueden permanecer por largos periodos de tiempo. Sin embargo, en algunos casos, el agua de drenaje de mina puede conservar la calidad del agua subterránea existente en los acuíferos y ser apropiada para uso doméstico, de agricultura e industrial (Fernández, R. y Gutiérrez, A. 1995).

Además del DA, el agua de minas presenta otras características químicas que son resultado tanto de su contacto con los minerales y sustancias presentes en los ambientes mineros, como de la mezcla con agua de diferentes características. La Tabla 9 Muestra la clasificación del agua de mina con base en el pH.

Tabla 9. Clasificación del agua de minas con base en el pH (Lottermoser, B. 2007).

Clase	Características
Extremadamente ácidas	pH < 1. Las rocas generadoras son ricas en piritas; presentan altas concentraciones de hierro, aluminio, sulfatos, metales, metaloides y sales minerales (que llegan a saturar el agua), lo que teóricamente provocaría la precipitación de minerales secundarios.
Ácida	pH < 5.5 Acidez generada por oxidación de sulfuros ricos en Fe. Se caracteriza por sus altas concentraciones de sulfatos (>1000 mg/L), hierro y aluminio (>100 mg/L), Cu, Cr, Ni, Pb, y Zn (>10 mg/L). Otros elementos como calcio, magnesio, sodio y potasio también pueden aparecer en altas concentraciones pero no constituyen preocupaciones ambientales, aunque pueden limitar el uso del agua por su contenido de sodio y dureza, al no ser adecuados para riego e influir en la toxicidad de algunos metales como el Zn.
Neutra a alcalina	6 > pH < 10. Las concentraciones acuosas de aniones y cationes varían de menos de 1 mg/L a varios cientos de miles de mg/L. En las aguas alcalinas los sulfatos y el bicarbonato son los principales aniones; y las concentraciones de calcio, magnesio, potasio y sodio son elevadas en comparación con el hierro y

el aluminio. Se han documentado concentraciones altas de sulfatos, metales (Cu, Cd, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Tl, U, Zn) y metaloides como (As, Sb, Se).

Se puede generar a partir de residuos de lixiviación alcalina (cianuración) o por procesos de neutralización de jales, drenaje de minerales y residuos no sulfurosos, residuos y minerales que se han oxidado completamente, minerales y residuos con abundantes minerales neutralizantes, y minerales o residuos de sulfuros agotados en los sulfuros generadores de ácido y enriquecidos en sulfuros que no producen ácido como galena, esfalerita, calcosita, covelita y estibinita.

Salina

pH altamente variable que influye en la concentración de iones acuosos.

Otra fuente de aportación de agua para la oxidación de minerales sulfurosos, es la humedad producida por la presencia de agua y por calentamiento durante la operación de las minas, gracias a los equipos de combustión interna, el abastecimiento de energía eléctrica, el gradiente geotérmico que aumenta a medida que se profundiza la explotación y el proceso de generación del DA que es una reacción exotérmica. Esta humedad consiste en una mezcla de aire seco con vapor de agua cuya fuente son los escurrimientos naturales y el flujo de agua a través de las obras y perforaciones afectadas; depende de la temperatura del lugar. El calentamiento de aire da lugar a la elevación de aire caliente y húmedo, permitiendo la entrada de aire fresco, frío y rico en oxígeno, lo que fomenta una oxidación adicional (Wolkersdorfer, C. 2006).

Otro de los factores involucrados en el comportamiento del agua de minas es el efecto de tormenta, especialmente cuando la infiltración llega a un acuífero libre, porque tiene relación con los cambios o la intermitencia de los niveles de agua, lo que fomenta la oxidación de minerales y la dilución de contaminantes. Esto se debe a las altas concentraciones de oxígeno en zonas no saturadas cuando el nivel de agua baja, lo que promueve la oxidación de minerales sulfurosos y puede resultar en un ciclo de oxidación-dilución. Sin embargo, las minas con niveles constantes de agua no están sujetas a este efecto, gracias a que las partículas sólidas se encuentran bajo un estado de saturación lo que reduce las concentraciones de oxígeno.

5.3.1 Interacción del relleno con el agua de la mina

El agua posee características diferentes en su comportamiento, de acuerdo con el medio en el que se encuentra alojada o a través del cual fluye, es decir, presenta un flujo diferente cuando se encuentra dentro de la masa de relleno (Figura 12), dentro de un macizo rocoso, en la interface roca/relleno o liberada en las obras de la mina. En los dos primeros casos, el flujo se puede comprender de la misma forma como ocurre con los tipos de acuíferos en función de los materiales que los conforman, pero en la interface roca/relleno, se forman flujos preferenciales entre ellos, dependiendo de las características de porosidad y permeabilidad de ambos como se observa en la Figura 11; por otra parte, en el caso de las obras mineras, el agua que fluye a lo largo de ellas tiende a irse a las zonas más bajas, en donde llega a almacenarse, e incluso a inundar, a menos de que sea bombeada.

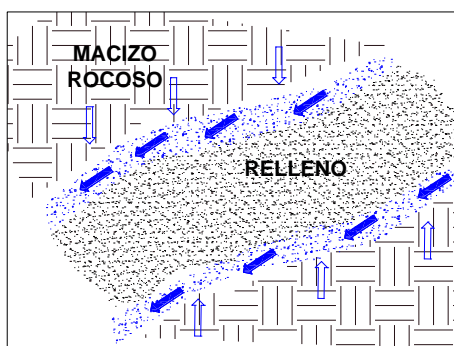


Figura 11. Flujo preferencial de agua a través de la interfase roca/relleno.

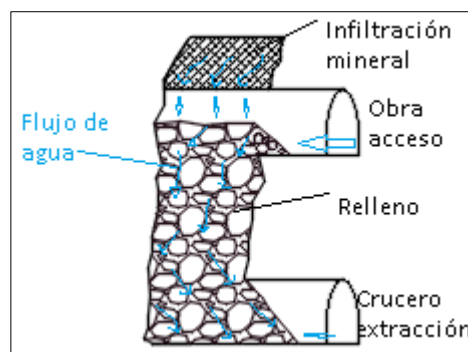


Figura 12. Flujo de agua a través de una masa de relleno permeable.

Las características físicas del relleno de minas, como el tamaño de partículas, distribución granulométrica, temperatura, porosidad y permeabilidad, pueden provocar comportamientos diferentes en el flujo del agua subterránea, de modo que un cuerpo de relleno hidráulico podría comportarse como un acuífero de poros; una masa de relleno en pasta podría ser rodeada por el flujo preferencial del agua o si fuese el caso de encontrarse fracturado a causa de una mala compactación, podría desarrollar fracturas y fisuras, a través de las cuales, el flujo del agua podría compararse con el que se presenta en un acuífero de fisuras, e incluso en un acuífero cárstico. De la misma forma, un cuerpo de relleno con tepetate podría comportarse como un acuífero de fisuras o cárstico.

El agua puede también sufrir estratificación, que se refiere al cambio de sus características químicas y físicas, de acuerdo a los niveles donde se encuentra debido a la temperatura y diferencias en las presiones. La estratificación del agua se puede romper por fuerzas externas, como terremotos, tormentas, contacto con otros fluidos y por el cuele de obras en las minas (Wolkersdorfer, C. 2006).

Así como el paso del agua a través del relleno puede tener características y efectos sobre el relleno, el relleno también puede tener efectos sobre las características y el flujo de agua de una zona, es decir, es capaz de ocupar espacios, en donde el agua simplemente no puede entrar, cambiando la dirección de flujo a su alrededor. Esto puede ser visto de manera positiva, debido a que los cuerpos de relleno pueden ser utilizados para canalizar caudales de agua hacia lugares deseados. Por supuesto, de acuerdo con lo que se ha revisado en este capítulo es muy importante tomar en cuenta los cambios químicos y físicos que adquiere el agua por el contacto con el relleno y los que ocurren por efecto de su paso a través del macizo rocoso.

Es indispensable recordar que por razones de seguridad operativa, la mayoría de las ocasiones, ya sea que se trate de la utilización de relleno hidráulico, o en pastas, se busca tener una mayor compactación para aportar mayor resistencia, y que por lo general, los rebajes son las principales obras en donde se dispone el relleno, por lo que se forman grandes cuerpos compuestos por

materiales de baja porosidad y permeabilidad que pueden llegar a ser capaces de aislar zonas permeables que originalmente pudieron ser buenas conductoras de agua y que por lo tanto, el flujo será alterado. Esto también podría provocar que al final de la etapa operativa de esa zona, el nivel freático recupere su posición original, provocando que el relleno permanezca localizado en una zona de saturación permanente.

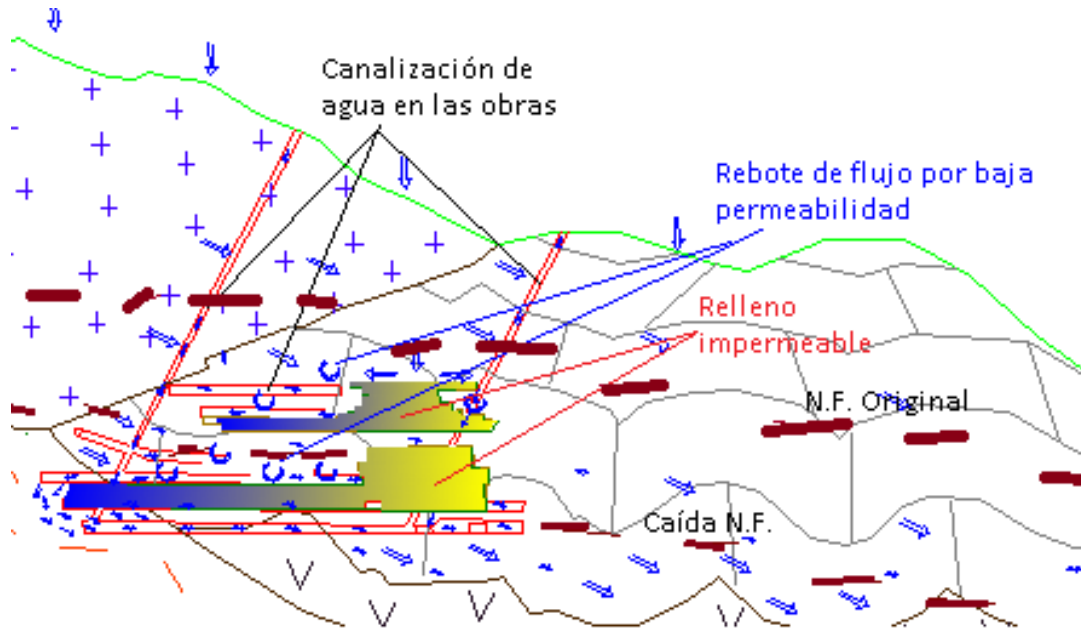


Figura 13. Alteración del flujo del agua por efecto de la colocación de relleno impermeable o poco permeable en rebajes.

En la Figura 13 se muestra la alteración en la dirección de flujo de una zona minera con rebajes que contienen relleno impermeable o con baja permeabilidad, se puede observar que previamente a la presencia de los cuerpos de relleno, el flujo mantiene la misma dirección que cuando las obras se encuentran vacías. Sin embargo, a medida que el agua se aproxima a los cuerpos de relleno, el flujo tiene un cambio de dirección y algunas zonas de turbulencia generada por el choque de agua que mantiene el flujo original con la que es “rebotada” por el relleno. Por otra parte, las zonas que se encuentran por encima del macizo rocoso pueden seguir manteniendo un flujo, aunque con menor caudal, en donde se conserva la dirección por las características del macizo rocoso. Por debajo de los rebajes donde está colocado el relleno, sobre todo en los niveles más bajos, el agua puede incrementar su capacidad de fluir tanto a través del macizo rocoso como a través de las obras que se encuentran abiertas. Finalmente, después de que el agua ha pasado las barreras formadas por el relleno, es probable que adquiera nuevamente su flujo natural incluso, el nivel freático original podría ser recuperado debido al cese del bombeo en lugares que ya no lo requieren y porque los espacios de los rebajes se encuentran ocupados.

5.3.2 Hidrogeoquímica por el contacto del agua de mina con el relleno

Como ya se ha mencionado en el capítulo 4, cuando los minerales de un yacimiento se encuentran bajo las condiciones geológicas de su ambiente natural, pueden considerarse químicamente estables. Sin embargo, a medida que van pasando por procesos que implican las actividades mineras, comenzando por las excavaciones, reducción de tamaño y por los ciclos hidrogeológicos, se van volviendo inestables, resultando en la disolución de minerales, el transporte de partículas, en la generación de DA y en la liberación de elementos y sustancias que se vuelven solubles y que son capaces de movilizarse. Además de los minerales, otros materiales que pueden tener los efectos mencionados son los jales o los minerales gastados de los procesos de lixiviación que son colocados dentro de las obras subterráneas. Sin embargo, no todas las operaciones mineras que exponen rocas y residuos sulfurosos pueden causar DA y los otros efectos no son exclusivos de ambientes con DA, porque también ocurren en ambientes neutros y alcalinos.

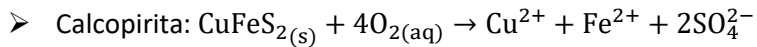
Las aguas de mina varían mucho en su composición, los constituyentes disueltos en ella pueden ser numerosos. Abarcan desde compuestos de nitrógeno (nitritos NO_2^- , nitratos NO_3^- , amonio NH_3), provenientes de los explosivos y de las soluciones de lixiviación con cianuro; además pueden contener reactivos del procesamiento de minerales y de las operaciones hidrometalúrgicas como ácido sulfúrico, cloruros y sulfatos.

Independientemente del mineral extraído y del proceso de beneficio utilizado, la mayoría de cationes presentes son Al^{3+} , Si^{4+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , aniones como Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} y HCO_3^- , los cuales son importantes constituyentes de las aguas de mina.

En particular, la liberación de iones metálicos resulta del intemperismo de minerales sulfurosos como esfalerita ($\text{ZnS}_{(s)}$), galena ($\text{PbS}_{(s)}$), y arsenopirita ($\text{FeAsS}_{(s)}$). Por otra parte, la acidez es generada por el desgaste principalmente de pirita que se pone en contacto con soluciones que contienen oxígeno disuelto. La subsecuente precipitación de hierro bajo condiciones oxidantes produce oxihidróxidos de hierro, denominados precipitados ocre y son visiblemente depositados como revestimientos de colores pardos en las superficies sólidas de las rocas. Las tres situaciones mencionadas representan riesgos ambientales a las fuentes de agua fresca.

Algunos metales sulfurosos, además de la pirita, no necesariamente producen acidez, también pueden liberar iones metálicos al agua, en función de los valores de pH, lo que implica que a medida que decrecen los valores de pH, incrementan las concentraciones de iones metálicos en solución. Algunos ejemplos de sus nombres, sus reacciones de desgaste y sus correspondientes metales se enlistan a continuación:

- Esfalerita: $\text{ZnS}_{(s)} + 2\text{O}_{2(aq)} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$
- Galena: $\text{PbS}_{(s)} + 2\text{O}_{2(aq)} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$
- Millerita: $\text{NiS}_{(s)} + 2\text{O}_{2(aq)} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$
- Greenockita: $\text{CdS}_{(s)} + 2\text{O}_{2(aq)} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$
- Covelita: $\text{CuS}_{(s)} + 2\text{O}_{2(aq)} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$



Los iones metálicos liberados en soluciones pueden permanecer solubles o ser precipitados como oxihidróxidos (por ejemplo, $\text{Zn}(\text{OH})_2(\text{s})$, $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$). La solubilidad de estas fases es crítica porque afecta la movilidad de iones metálicos en el agua. La Figura 14 muestra la dependencia de la solubilidad de algunos minerales hidróxidos metálicos del pH.

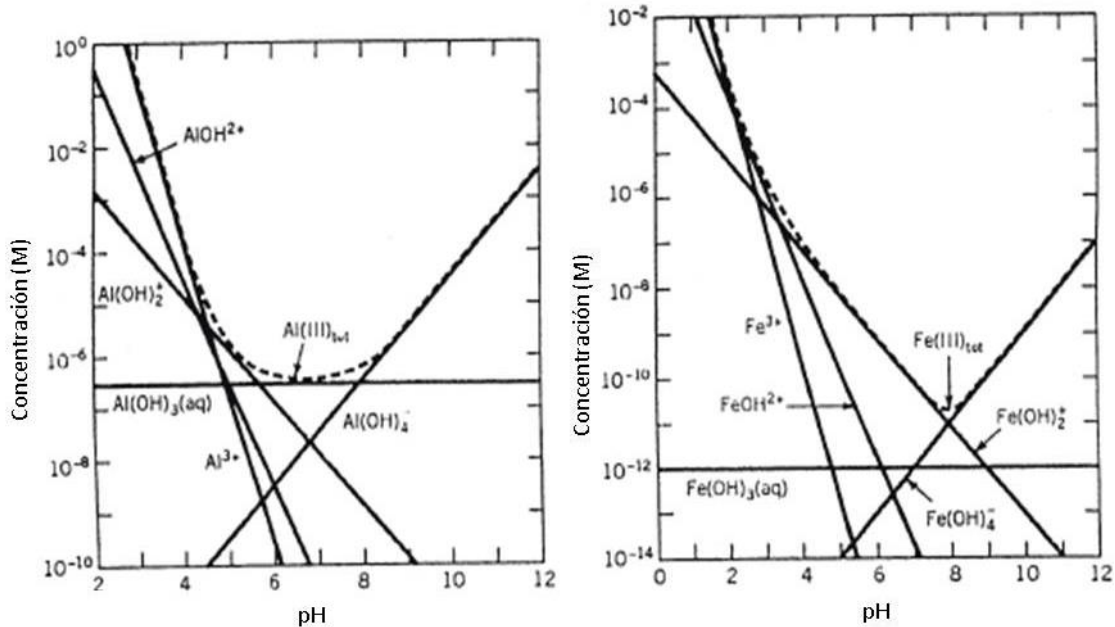


Figura 14. Dependencia de la solubilidad para aluminio e hidróxidos de hierro. Nótese que debajo de un pH neutro, la solubilidad de estas fases incrementa con la disminución del pH. Esto enfatiza el rol del pH como variable principal de control de la solubilidad (Younger, P. et al. 2002).

Algunos de los precipitados de elementos en forma de sulfatos son: Fe^{3+} en jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6(\text{s})$), Fe^{2+} en melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(\text{s})$), Al^{3+} en alunita ($\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6(\text{s})$) y Pb^{2+} en anglesita ($\text{PbSO}_4(\text{s})$). Aunque también puede ocurrir precipitación por formación de carbonatos como Pb en ($\text{PbCO}_3(\text{s})$) cerusita, y Cu en malaquita ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2(\text{CO}_3)(\text{s})$), o por formación de silicatos. Sin embargo, la formación de minerales portadores de sulfatos se ve favorecida donde una ha ocurrido una considerable oxidación de piritita. En general, las altas concentraciones de sulfatos pueden asociarse con pH bajo.

En los precipitados también se pueden alojar una variedad de cationes como impurezas por ejemplo Al, Cr, Ga, V, Mn, Co, Pb, Ni, Zn y Cd que reemplazan al hierro en la goetita. De igual modo, la jarosita incorpora elementos en su estructura cristalina como Cu, Zn, Pb, K, Na y Ca.

Por otra parte, cuando los minerales coloidales precipitan durante la formación de ocre como es el caso de algunos hidróxidos de hierro, pueden permanecer suspendidos en solución y ser transportados por las descargas de agua de minas y posteriormente ser inmovilizados por deposición en zonas quietas en corrientes receptoras.

La precipitación de sólidos está acompañada de la disminución de elementos y compuestos en la solución, resultando en bajas cantidades de sólidos disueltos en el agua de mina. Es por esto que la formación de ocre en las aguas de mina podría ser considerada como un mecanismo de atenuación a la contaminación de agua, dando lugar a algunas reacciones de adsorción con algunos iones metálicos que dependen de los valores de pH.

La erosión mecánica de los lechos de las corrientes, causada por cambios en el flujo del agua o por eventos estacionales de lluvia puede movilizar nuevamente algunos contaminantes adsorbidos en sedimentos, influenciando los valores de pH, debido a que su disolución puede consumir o generar iones hidrógeno, principalmente es el caso de las sales solubles de Fe^{3+} , Al^{3+} y Mn^{2+} .

La carga de los iones metálicos es elemental para establecer la adsorción con los hidróxidos de hierro, en general, **los iones metálicos catiónicos son adsorbidos más fuertemente a medida que el pH incrementa.**

Partiendo del análisis de estos procesos, se puede presentar una regla general que es muy importante para el agua de minas: **“la disminución del pH se asocia con el incremento de la solubilidad de hidróxidos metálicos y minerales oxidados, y con el incremento de la movilidad de los iones metálicos”**.

El arsénico y plomo son los metales más adsorbidos a valores ácidos de pH, mientras el Zn^{2+} , Cd^{2+} y Ni^{2+} son adsorbidos a pH neutro. La resistencia a la fuerte adsorción de los iones como Zn^{2+} , Cd^{2+} y Ni^{2+} a la fuerte adsorción en una región de pH de ácido débil (pH 5-7) representa la dificultad de la eliminación de estos iones del agua de mina. Esta dificultad también surge a pH neutro y alcalino, los iones carbonatos pueden formar complejos metálicos disueltos estables como $\text{ZnCO}_3(\text{aq})$ que compiten por el ion metálico con el hidróxido de hierro. La formación de estos complejos ayuda a mantener los iones en solución en lugar de inmovilizarlos en las superficies de los minerales.

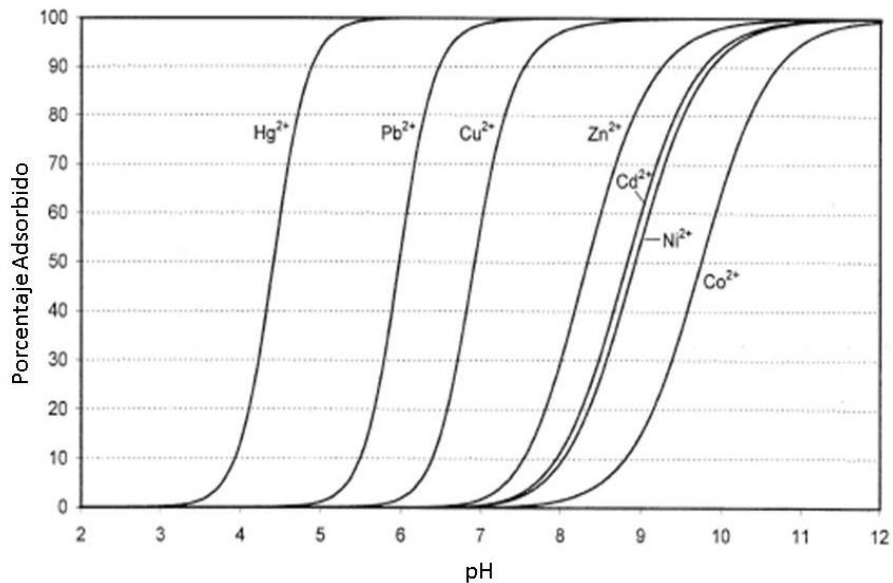


Figura 15. Dependencia del pH de la adsorción de algunos iones metálicos en hidróxido de hierro (Younger, P. et al. 2002).

Resulta claro que el aumento del pH actúa para eliminar las especies en solución, mientras que la disminución actúa para mantenerlos en solución. Además, una caída del pH puede provocar una re-movilización de iones metálicos que se encontraban adsorbidos a los hidróxidos de hierro, lo que se debe a la alta actividad de protones en solución que provoca la desorción.

La presencia de sales solubles en las zonas no saturadas de agua subterránea y de residuos mineros es importante porque influye en los cambios de las características químicas del agua.

La evaporación causa precipitación de minerales secundarios que pueden alojar metales, metaloides, sulfatos, e iones hidrógeno y frenar su movilidad, pero solo temporalmente hasta que ocurra la siguiente lluvia que eleve los niveles de agua en la mina, lo que provocaría la disolución de estos precipitados y resultaría en altas concentraciones de sulfatos, metales y metaloides, así como acidez elevada. Esto se resume en que los ciclos de humedecimiento y secado pueden resultar en variaciones dramáticas de la acidez y concentraciones de metales y metaloides.

Mientras que los sedimentos pueden eliminar iones de las soluciones, también pueden liberar los metales adsorbidos si el agua se acidifica. En contraste, otros elementos como arsénico y molibdeno pueden desorberse a pH neutro o alto para formar oxianiones en el agua (AsO_4^{3-}), al igual que, el uranio, cobre y plomo, para formar complejos de carbonatos acuosos. Los iones de sulfatos, metales y metaloides pueden desorberse y recuperar su movilidad a valores de pH neutros o alcalinos y por lo tanto, los sulfatos disueltos, las concentraciones de metales y metaloides pueden incrementar en el agua de mina si incrementa el pH.

La capacidad del agua para transportar metales y metaloides también depende del Eh de la solución (potencial de óxido-reducción). Metales como Cr, Mo, Se, Va, y U son más solubles en sus

estados oxidados (por ejemplo U^{6+} , Cr^{6+}) como oxianiones que en sus estados reducidos (por ejemplo Cu^{4+} , Cr^{3+}). Estas características se pueden describir con los diagramas de Eh-pH. Las aguas oxidadas neutras a alcalinas pueden tener altas concentraciones de metales como Cd, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, U, Zn y metaloides como As, Sb, Se. Este tipo de agua es una preocupación ambiental porque los elementos tienden a permanecer en solución a pesar de los cambios de pH.

En particular, los elementos que forman oxianiones en agua (As, Se, Sb, Mo, V, W) son bastante móviles bajo condiciones de pH neutro.

5.4 Efectos ambientales del relleno

La minería trae consigo efectos ambientales no reversibles, que es necesario minimizar en lo máximo posible. En particular, las actividades de relleno de minas tienen influencia sobre los siguientes efectos ambientales:

- Calidad del agua. Puede verse alterada por la producción de DA y/o por la liberación de EPT. Estos procesos se revisaron en el capítulo 2, es importante recordar que las fuentes que intervienen pueden ser tanto los residuos mineros (relleno) como el macizo rocoso de las minas, que de no ser controlados adecuadamente pueden resultar en afectaciones al suelo, y posteriormente, tener efectos en la salud de los seres vivos.
- Variaciones en la dirección del flujo, en el caudal del agua subterránea y en el nivel freático, dependiendo de las actividades de bombeo. Si después de la colocación del relleno existe un nivel de agua constante, el efecto puede ser mínimo pues se mantiene un estado de saturación en el que no se promueve la oxidación y la dilución de minerales; pero si el nivel de agua crece y decrece intermitentemente podría presentarse la situación contraria y ser adversa.

Los posibles efectos mencionados podrían ser controlados a través de la expedición de una norma oficial mexicana que los contemple para llevar a cabo la disposición final de residuos mineros en forma de relleno, como se indica en el Artículo 34 del Reglamento de la LGPGIR. Dicha norma debería generarse con base en las características estudiadas de los residuos, de las obras mineras, de los sitios de interés y del agua presente en ellos, que determinan los procesos de intemperismo de los residuos y los efectos mencionados. Esto también conduce a determinar que se requieren las autorizaciones de impacto ambiental para la utilización de residuos mineros provenientes de plantas que no utilizan sustancias peligrosas y el relleno hidráulico que se excluyen en el Artículo 5, inciso L, punto III del Reglamento de la LGEEPA, porque, se sabe que las características de peligrosidad de los residuos mineros no son determinadas por la utilización de sustancias peligrosas en su beneficio, sino que dependen principalmente, de su mineralogía y de las condiciones presentes en las obras mineras.

El relleno se convierte en una alternativa muy importante para la disposición final de residuos mineros, siempre y cuando se haga aplicando acciones que permitan evitar los efectos ambientales mencionados arriba.

- Los efectos del paisaje por el uso de relleno pueden ser positivos o negativos. Al colocar los residuos mineros como relleno, se reduce la cantidad de presas de jales construidas en superficie, tepetateras y patios de almacenamiento; las pilas de mineral gastado de los procesos de lixiviación podrían ser eliminadas; por otra parte el control de hundimientos y subsidencia podría reflejarse en la disminución de las alteraciones del paisaje. Sin embargo, la instalación de plantas para preparar los materiales de relleno en superficie puede producir efectos permanentes sobre los paisajes cuando las áreas que ocupaban no son restauradas al final de su vida útil, el mismo problema se puede presentar por la construcción de caminos, desmontes, desviaciones de corrientes de agua y construcción de obras para el transporte del relleno, o porque este es obtenido de fuentes superficiales.

6. CRITERIOS PROPUESTOS PARA UN MARCO REGULATORIO

6.1 Marco regulatorio justificativo

La importancia del relleno de minas radica en los tipos y cantidad de residuos que son dispuestos finalmente en las obras mineras, los cuales podrían tener efectos ambientales que se determinan en función de las condiciones presentes en los sitios de disposición final.

El relleno de minas es una actividad que se ha realizado por mucho tiempo y que está permitida en México por la LGPGIR, y su Reglamento, cuyos artículos 17 y 34, respectivamente, señalan la posibilidad de que los residuos generados por la industria minero-metalúrgica sean dispuestos finalmente en el sitio de su generación, específicamente los residuos mineros como relleno, de acuerdo con las normas oficiales mexicanas que se expidan para dicho efecto. Dichas normas a la fecha no han sido expedidas, razón por la que en este capítulo se propone una serie de criterios basados en la investigación realizada, contemplando las especificaciones de las normas oficiales mexicanas para residuos mineros que se consideraron útiles y aplicables a su uso como relleno de minas, tal fue el caso de las NOM-141-SEMARNAT-2003, NOM-155-SEMARNAT-2007, NOM-159-SEMARNAT-2011 y NOM-157-SEMARNAT-2009.

Así como para la propuesta de criterios sobre la caracterización de residuos mineros se han considerado las citadas normas, para proponer criterios sobre la cantidad y calidad del agua, se han considerado otras normas como la NOM-127-SSA1-1994 y la NOM-011-CONAGUA-2000.

A continuación se describen y se justifican los aspectos que deberían ser considerados en la elaboración de una Norma Oficial Mexicana en materia de relleno de minas.

6.2 Caracterización del sitio

La caracterización de los sitios de disposición final permite conocer las condiciones presentes y determinar las que podrían tener efectos sobre el medio ambiente en las zonas de las minas que utilizan relleno. De acuerdo con las especificaciones de las normas que abarcan la caracterización de sitios de disposición final, se determinó que las que resultan aplicables a las actividades de relleno de minas son las siguientes.

6.2.1 Clima

Entre las variables del clima que se deberían caracterizar por interactuar con los residuos y con el macizo rocoso son la temperatura y la precipitación pluvial. La temperatura de una región influye en la temperatura de las rocas y se relaciona con la humedad de las obras mineras. Cuando existe la presencia de bacterias que promueven la oxidación y el intemperismo de los minerales, la temperatura también resulta ser un factor de importancia en esos procesos.

6.2.2 Precipitación pluvial

La precipitación se relaciona con los escurrimientos de agua sobre la superficie del terreno. De eso depende la cantidad de agua que se infiltra al interior de las minas junto con la permeabilidad del suelo. La estimación de la precipitación puede resultar de utilidad en una etapa de diseño, cuando en algún proyecto se determine la construcción de obras para la canalización de aguas superficiales con la finalidad de evitar su infiltración. Sería conveniente utilizar la información sobre precipitación media mensual, promedio anual y máxima extraordinaria.

6.2.3 Topografía

Influye en la intermitencia de los niveles de agua subterránea, de modo que, cuando una mina se encuentra en una zona montañosa, los escurrimientos superficiales no permiten la infiltración de gran cantidad de agua pluvial y los niveles de agua subterránea tienden a tener variaciones importantes. Por otra parte cuando las minas se encuentran en zonas planas, la infiltración tiende a ser mayor porque el flujo del agua ocurre a menor velocidad que en una pendiente y los niveles de agua subterránea se mantienen constantes.

6.2.4 Coeficiente de escurrimiento

Se refiere al porcentaje de agua que escurre sobre la superficie del terreno y está en función del tipo de suelo y de su uso. Este parámetro permitiría estimar de manera indirecta el porcentaje de agua que se puede infiltrar en el suelo. La NOM-011-CONAGUA-2000 establece los procedimientos para la determinación de este parámetro.

6.2.5 Infiltración de agua en suelo

La infiltración de agua en el suelo se puede determinar mediante pruebas de campo. Esta agua en algún momento podría formar parte importante del acuífero y estará en contacto directo con el macizo rocoso y el relleno. La NOM-011-CONAGUA-2015, "Conservación del recurso agua", en sus especificaciones proporciona un método para estimar la disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero que depende de la recarga total media anual.

6.2.6 Permeabilidad en rocas

La permeabilidad de las rocas presentes en las obras mineras es un parámetro del que depende parte del flujo de agua a través de ellas, por lo que también tiene influencia en la calidad del agua. Sería muy conveniente contar con la información respecto a los tipos de roca que presentan permeabilidad suficiente para permitir el flujo de agua, ya que ayudaría a establecer los modelos de transporte del agua.

6.2.7 Características estructurales de la roca.

Determinar la presencia y los patrones de fisuras, fracturas y fallas en la roca resulta importante ya que se pueden relacionar con la infiltración de agua hacia el interior de la mina, debido a que son

un factor que determina flujos preferenciales en zonas determinadas. Podrían ser útiles para conocer los patrones o la dirección del flujo a través del macizo rocoso.

6.2.8 Caracterización del macizo rocoso

Los tipos de rocas presentes en el macizo rocoso deben ser considerados debido a que sus características mineralógicas, podrían influir en la calidad del agua, dependiendo del contenido de minerales consumidores de acidez y de su contenido de elementos traza, principalmente en las zonas de contacto con el yacimiento mineral. Las rocas podrían constituir un elemento de atenuación en la formación de drenaje ácido (DA). Determinar las características de la roca permitiría implementar métodos de codisposición, en donde los minerales del macizo rocoso neutralicen la acidez generada por residuos mineros.

6.3 Caracterización del acuífero

6.3.1 Identificación del acuífero

De acuerdo con la regionalización que hace la Conagua, se puede establecer la presencia de acuíferos en el sitio donde se ubica la mina. Además, las campañas de barrenación que se hacen durante la exploración en las minas, deberían proporcionar información suficiente para identificar la presencia de agua subterránea en el sitio.

6.3.2 Estratigrafía

Determinar la estratigrafía de una zona minera sirve para ubicar el tipo de rocas presentes que alojan el acuífero y las obras mineras, y con base en eso, conocer los efectos de las características de las rocas presentes y del flujo del agua, en relación con la ubicación de las obras mineras.

6.3.3 Clasificación del acuífero

Conocer el tipo de acuífero permite tener nociones acerca de la dirección y flujo de agua a través y alrededor de él, es decir, cuando se trata de un acuífero confinado, la capa impermeable superior no permite la mezcla del agua contenida dentro del acuífero con la de infiltración a menos que se cuelean obras mineras que cambien esa condición; o si se trata de capas confinantes laterales o inferiores, ocurre lo mismo, de manera que si se cuelean obras que las afecten podrían comenzar a mezclarse las aguas provenientes de otros cuerpos de agua subterráneos con el agua que conforma el acuífero en cuestión. Lo contrario ocurre con un acuífero libre en el que además de poderse mezclar con agua proveniente de otras zonas, generalmente presenta fluctuaciones del nivel freático.

6.3.4 Profundidad y espesor

Conocer la profundidad del nivel freático y el espesor del acuífero donde se localiza la mina sirve para determinar la presencia de agua en las obras mineras, lo que sería útil para establecer

acciones preventivas al momento de realizar operaciones a esa profundidad. De este modo, cuando se construyen obras en un acuífero con gran espesor, es necesario el abatimiento del nivel freático a través de bombeo constante y cuando se trata de obras que cortan un acuífero de espesor pequeño, el agua tiende a fluir hacia el fondo de ellas. Estos datos permiten tener control sobre el movimiento del agua para poder realizar las operaciones mineras.

6.3.5 Dirección y tipo de flujo

El contar con esta información podría servir para ubicar puntos de muestreo para determinar la calidad del agua. Un flujo laminar podrá pensarse que tiene menos efectos que un flujo turbulento, debido al diferente desgaste mecánico que podría presentarse. También sería de utilidad conocer la dirección en la que se mueve el agua para prever la zona de obras que tendrán contacto con ella.

6.3.6 Composición química

El conocimiento de los parámetros químicos del agua puede ser utilizado para monitorear la calidad del agua antes y después de las obras mineras. Como referencia se puede considerar la NOM-127-SSA1-1994, que establece la calidad del agua para consumo humano. Esta norma es útil para controlar que no se rebasen los límites máximos permisibles de constituyentes en agua.

6.3.7 Ubicación de aprovechamientos y usos del agua

Verificar la existencia de aprovechamientos hidráulicos aguas abajo y el uso que se les da, permite establecer las medidas necesarias en la operación de la mina para evitar la afectación del agua y establecer los límites máximos permisibles que garanticen la no afectación a su calidad.

6.4 Caracterización de los residuos mineros

6.4.1 Tipo de residuo y proceso generador

Los residuos utilizados como relleno pueden tener diferentes efectos sobre la calidad del agua, dependiendo de los procesos que los hayan generado y del uso de reactivos. Es por ello que se deberá contar con la descripción del método de beneficio y la siguiente información.

- **Granulometría.** Se relaciona con la porosidad y permeabilidad de los residuos. Se podría pensar que a menor tamaño de partícula, mayor superficie expuesta y mayor reactividad y viceversa. Sin embargo, el flujo de agua a través de las partículas tiende a tener comportamientos diferentes, es decir, cuando se presentan partículas muy finas, se comienzan a comportar como materiales impermeables que dificultan el paso del agua a través de ellas y su intemperismo se frena, tal es el caso de las arcillas; de otra forma las partículas gruesas tienden a presentar mayor permeabilidad, lo que podría acelerar su intemperismo.

- Contenido de reactivos. Los reactivos remanentes en los residuos pueden aportarles características de reactividad, posteriormente a su colocación, con efectos sobre su resistencia física y química, a través de la granulometría, potenciales de lixiviación u oxidación y de cambios en el pH. Estos datos pueden ser utilizados para decidir si los residuos serán sometidos a algún tratamiento previo a su colocación como relleno, por ejemplo, en algunos casos, los residuos provenientes de los procesos de lixiviación, son lavados antes de ser dispuestos finalmente. Algunos reactivos que deberían ser considerados son: ácido sulfúrico y cianuro que podrían ser peligrosos a elevadas concentraciones y resultar en afectaciones a los ecosistemas.

6.4.2 Volumen de generación

Estimar el volumen de generación de residuos permite saber cuál será el porcentaje que podrá ser dispuesto dentro de las obras mineras de acuerdo con sus dimensiones y programar estas actividades como una operación más en la mina. Esto también podría utilizarse para diseñar métodos de prevención y de remediación de la calidad del agua.

6.4.3 Permeabilidad de los residuos

Depende del tipo y granulometría de las partículas. Se relaciona con el grado de saturación de los residuos, por lo que unos residuos con permeabilidad alta presentarán mayores efectos de oxidación o movilización de EPT.

6.4.4 Mineralogía y composición química

La mineralogía de los residuos es muy variable y particular en cada mina. Cada mineral y elemento presente en los residuos tiene diferentes comportamientos ante las condiciones a las que se encuentran expuestos en los sitios de disposición final. Algunos ejemplos de constituyentes que no consideran las normas oficiales mexicanas para caracterizar residuos son: Al, Cu, Fe, Mn, Zn, Na y Ni, los cuales son importantes porque pueden ser provenientes de residuos mineros y por estar contemplados en las normas que regulan la calidad del agua. Otros que podrían ser analizados son: Bi, Co, In, Mo, Sn, Tl, Ti, V, Au, Ga, Ge, porque pueden encontrarse como elementos traza en los minerales de un yacimiento y por lo tanto, ser liberados y movilizados de los residuos mineros.

6.4.5 Potencial de generación de drenaje ácido

Es una de las características que más se contemplan en la evaluación de la peligrosidad de los residuos mineros en las normas. Actualmente las normas oficiales mexicanas en materia de residuos mineros, señalan los procedimientos para determinar su peligrosidad con base en su potencial para generar DA; estos procedimientos pueden ser utilizados para determinar la peligrosidad del residuo cuando va a ser utilizado como relleno.

6.4.6 Potencial de liberación de metales traza

El procedimiento para determinar la movilidad de los metales traza también está descrito en las normas oficiales mexicanas sobre residuos mineros y también pueden ser utilizados para caracterizar el residuo que va a ser utilizado como relleno. Es importante analizar las condiciones de cada constituyente presente en los residuos, debido al diferente comportamiento que presentan para ser movilizados. Esto se justifica porque los jales sulfurosos tienden a movilizar sus constituyentes a valores bajos de pH. Sin embargo, algunos elementos como Cu, Cd, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Tl, U, Zn, As, Sb, Se, sulfatos y bicarbonato, se encuentran a elevadas concentraciones en aguas neutras y alcalinas, y también afectan el agua subterránea.

6.5 Obras mineras y método de minado

6.5.1 Descripción de las obras mineras

Las características de las obras mineras que se pueden contemplar son:

- Dimensiones: permiten determinar la capacidad de almacenamiento de residuos en cuanto a volumen y tienen relación con la resistencia de las rocas, lo que permite seleccionar el tipo de relleno. También puede considerarse una herramienta para determinar si se requiere optar por algún método de disposición final adicional, ya que como se sabe, las rocas al ser fragmentadas y molidas incrementan su volumen.
- Resistencia de las obras. Permite definir los ciclos operativos, así como, los sistemas de soporte, estabilización y el tipo de relleno a utilizar para evitar caídos de roca, colapsos y subsidencia, o para permitir la recuperación de pilares que contienen valores económicos que justifiquen su extracción.

6.5.2 Descripción del método de minado

La secuencia de minado permite determinar el método de colocación más óptimo (incluyendo transporte, ciclos operativos, periodos de colocación en relación con el tipo de relleno para lograr la consistencia y resistencia requerida):

- Relleno de tepetate. Se utiliza cuando no hay tiempo de espera para realizar el siguiente corte superior y cuando no se utiliza precisamente por necesidades de soporte, a menos que se encuentre cementado.
- Relleno hidráulico. Se utiliza cuando el ciclo operativo da tiempo suficiente para permitir la decantación y el drenaje del relleno, así como para construir las obras de decantación.
- Relleno en pasta: Requiere mayor energía e instalaciones para su manejo así como tiempos de fraguado y consolidación por lo que para utilizar este tipo de relleno es muy importante tener en cuenta la presencia de agua en las obras mineras.

Durante el periodo de colocación y consolidación es muy importante que el relleno, cualquiera que sea el tipo, se coloque en lugares no inundados. Una vez que se hayan consolidado, pueden permanecer tanto en obras inundadas como secas.

6.5.3 Ubicación de las obras con respecto del acuífero

Se deben elaborar planos donde se ubiquen las obras donde habrá presencia de agua y con base en eso tomar medidas preventivas para evitar o minimizar el contacto del agua con los residuos.

6.5.4 Conducción de agua dentro de la mina

Es una forma de controlar el flujo de agua y evitar su contacto con los residuos. Esto se puede hacer mediante la construcción de obras que permitan canalizar el agua fuera de las obras donde se coloca el relleno.

6.5.5 Sellado de rebajes

Podría contemplarse cuando los residuos resulten ser potenciales generadores de acidez o cuyos análisis indiquen que tienen potenciales de afectación sobre la calidad del agua, como una medida preventiva para minimizar efectos adversos.

6.6 Monitoreo

Es importante que al iniciar las operaciones en la mina se lleve a cabo una caracterización de la calidad del agua subterránea, una vez que ya se conocen las concentraciones iniciales, se puede partir de ellas y de las especificaciones de la NOM-127-SSA1-1994 para conservar dicha calidad.

6.6.1 Elaboración de un programa de monitoreo

Es necesario para controlar la calidad del agua en una etapa posterior al cierre. El monitoreo podrá hacerse, al inicio dos veces por año cubriendo las épocas de estiaje y lluvias, a menos que con el paso del tiempo, se vea que la alteración de la calidad es significativa.

6.6.2 Ubicación de puntos de muestreo dentro de la mina

La ubicación de los puntos de muestreo podría realizarse en los lugares más representativos donde exista flujo de agua, es decir, el agua que se encuentra en contacto con los residuos, el agua que fluye por el macizo rocoso, y la que fluye a través de las obras mineras, además del agua de los pozos de observación aguas arriba y aguas abajo de la mina. Esto sirve para identificar la influencia en los cambios de la calidad del agua, de cada medio a través del cual fluye.

6.6.3 Ubicación de puntos de muestreo superficiales

Los puntos de muestreo de cuerpos de agua superficiales pueden ubicarse tanto aguas arriba como aguas abajo con respecto a la zona minera, ya que éstos pueden tener influencia en la

infiltración de agua hacia las obras mineras. También hay que considerar que el agua subterránea puede influenciar la calidad del agua superficial.

6.6.4 Monitoreo de pozos de observación fuera de la mina

En los casos en que no existan pozos de abastecimiento cercanos a la mina, se deberán construir pozos de observación aguas arriba y aguas abajo de ella. Estos pozos deberán estar equipados para la toma de muestras y medir la profundidad del nivel freático.

6.6.5 Periodicidad del muestreo

Podría ser establecida con base en las variaciones de la precipitación de cada zona, lo que permitiría obtener datos precisos sobre la influencia del flujo de agua en el desgaste de los residuos bajo las condiciones de relleno.

6.6.6 Definición del procedimiento de muestreo

Sirve para estandarizar las actividades a realizar y los parámetros a evaluar para que cualquier individuo pueda realizar el muestreo, sin que se generen importantes desviaciones sobre los resultados. La toma de muestras se podría hacer con base en el “Manual de Muestreo, Técnicas de Parámetros *In Situ*, y Estrategias de Monitoreo para la Vigilancia del Agua Subterránea” de la Conagua (Livni, N. et al. 2015).

6.6.7 Definición de parámetros a analizar

Entre los parámetros a analizar se deben contemplar los que se describen en la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 que se han emitido para tal efecto, entre los que se encuentran:

- pH
- Conductividad eléctrica
- Otros parámetros que hayan sido analizados y que se determine que pudiesen derivarse del contacto del agua con los residuos mineros, por ejemplo:
 - ✓ Concentraciones de metales y metaloides indicados en la NOM-127-SSA1-1994
 - ✓ Límites máximos permisibles de constituyentes mayores
 - ✓ Límites máximos permisibles de cationes disueltos
 - ✓ Límites máximos de compuestos como sulfatos y cianuros.

7. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Algunas minas han realizado y publicado sus estudios de caracterización de residuos, y en algunos casos, han contemplado únicamente a las obras mineras, a los materiales estériles y a las presas de jales como fuentes generadoras de drenaje ácido (DA) y de liberación de elementos potencialmente tóxicos (EPT); por lo que no se conoce un caso reportado en el que el relleno con residuos mineros constituya una fuente generadora. Sin embargo, algunos datos disponibles, como las características de los residuos y las condiciones presentes en los sitios de disposición final, son suficientes para realizar un análisis y plantear diferentes escenarios en los que intervienen los factores más importantes para promover estos procesos.

En este capítulo se hace un análisis de tres ejemplos de minas mexicanas que utilicen sus residuos mineros como relleno, de acuerdo con datos que se encuentren al alcance del público en general, como son: resultados de la caracterización de sus residuos, de la calidad y comportamiento del agua del sitio y las condiciones presentes en los sitios de disposición final, con el propósito de hacer un planteamiento hipotético de diferentes escenarios en los que esos residuos, colocados bajo las condiciones determinadas en la mina de estudio, no sean potencialmente peligrosos. Todo esto con el fin de reforzar y complementar los criterios que se establecen en el Capítulo 6 de esta tesis.

El análisis realizado consistió en:

- a) Conocer dos casos de minas que utilicen relleno de obras subterráneas con los residuos que generan y que cuenten con resultados de estudios de caracterización de sus residuos mineros (jales, tepetate o mineral gastado) para generar una base de datos acerca de sus características de peligrosidad.
- b) Analizar las condiciones presentes en las obras mineras que podrían dar lugar a la generación de DA y liberación de EPT, considerando los resultados de caracterización de los residuos.
- c) Determinar la influencia de la presencia y flujo de agua subterránea con base en los puntos a) y b).
- d) Realizar un análisis general que consiste en:
 - De presentarse un caso en el que los residuos caracterizados se encuentren dispuestos en depósitos superficiales, suponer su colocación como relleno y analizar las condiciones subterráneas presentes, contemplando:
 - ✓ Características de los jales
 - ✓ Planteamiento hipotético de las condiciones presentes en los sitios de disposición final (obras mineras) correspondientes a las características geológicas de la mina.
 - ✓ Presencia y características del acuífero correspondiente a la zona de interés.
 - ✓ Tipo de relleno (Analizar los efectos de cada tipo de relleno que se utiliza y que se considere aplicable), en función de los dos aspectos anteriores.

- De ser el caso en el que los residuos tengan efectos de DA y movilización de EPT en agua, bajo las condiciones presentes en las obras mineras, analizar su influencia, así como las características de los residuos y el tipo de relleno. Posteriormente proponer hipotéticamente las alternativas de cambios sobre los aspectos que se presentan (sitios, residuos y características del relleno), que podrían servir para minimizar o mitigar los efectos mencionados.
- e) Analizar y reforzar a los criterios propuestos del Capítulo 6.

7.1 Ejemplo 1 “Santa Eulalia”

Ubicación. Santa Eulalia es una unidad minera que se localiza en el estado de Chihuahua, que a partir del año 1971 cuenta con dos minas en explotación: San Antonio y Buena Tierra, de las cuales, la primera alcanzó a aportar el 90% de la producción, razón por la que esta será el enfoque principal de este caso. Fue hasta 1976 cuando se implementó el sistema de Corte y Relleno Hidráulico (Peña, J. 1987).

Fisiografía.- Corresponde a la provincia de Sierras y Llanuras del Norte, compuesta por sierras abruptas que se elevan hasta los 3000 msnm y de Llanuras con 800 m a 1000 m de elevación. El relieve se compone por llanuras aluviales y bajadas principalmente, aunque muestra sierras escarpadas y plegadas, y lomeríos escarpados y ramificados. Presenta una altitud media de 1200 msnm.

Hidrología.- Pertenece a la cuenca del río Chuvíscar, la vertiente superficial es casi nula, formada por el arroyo de Santa Eulalia y otros pequeños que corren solo durante épocas de lluvia. La sierra de Santa Eulalia es drenada por arroyos intermitentes que corren al sureste hacia los valles Dolores y Tabaloapa, desembocando en el río Chuvíscar.

Agua subterránea.-La zona de interés pertenece al acuífero “Aldama-San Diego”, que se aloja en un sistema granular no consolidado de origen aluvial, constituido por depósitos de arenas intercaladas con limos y arcillas, sus espesores varían de 30 a 800 m, y es de tipo libre. La fuente principal de recarga es el agua de lluvia que se infiltra en las zonas topográficamente altas, otra menor fuente de recarga está representada por infiltración vertical del agua de lluvia que se precipita en el valle y en menor proporción por los retornos de riego agrícola, la aportación de agua no es constante y depende de la cantidad de lluvia que precipita en la zona, en época de sequía el nivel freático ha disminuido hasta 10 m (Tellez, R. 2001). La profundidad al nivel de saturación o estático, medida desde la superficie del terreno, varía de 10 a 100 metros (Semarnat 2015).

Clima.- Se clasifica como semiárido, extremoso, su temperatura máxima es de 40°C y su mínima de -14°C. La precipitación pluvial media anual en el municipio es de 350 mm, y un promedio de 60 días de lluvia.

Geología.- El distrito está compuesto por una secuencia de rocas sedimentarias del Cuaternario (34.6%), entre las que se encuentran aluvión, limo, arena y grava; Cretácico (11.4%) conformadas

por caliza, lutita y arenisca; y Neógeno (10.7%) sobreyacidas por rocas volcánicas del Terciario (43.0%) compuestas de basalto, riolita, ignimbrita, toba riolítica, dacita y conglomerado polimíctico piroclástico. Las rocas son principalmente ígnea extrusiva: riolita-toba ácida (42.4%), basalto (0.6%), riolita (0.5%) y andesita (0.1%) y las sedimentarias: caliza (11.4%) y conglomerado (10.1%).

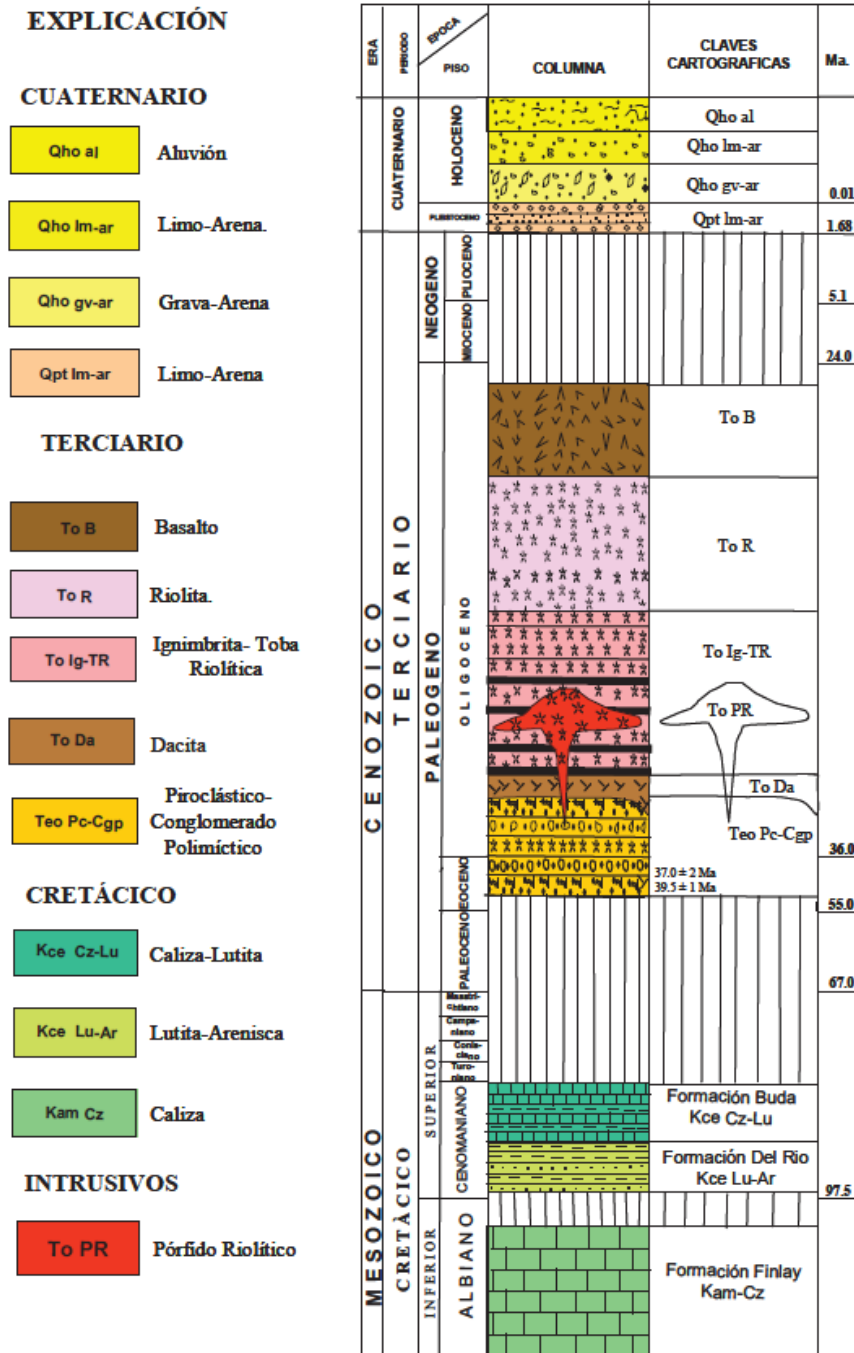


Figura 16. Columna estratigráfica de la Carta Aquiles Serdán H13-C67 (Moreno, L. 2016)

En la mina San Antonio la formación Finlay (Kam Cz Caliza) consiste de caliza gris oscuro a negro de estratificación gruesa a masiva, con moderada silicificación, esporádicas capas dolomitizadas color café claro y/o oscuro, exhibe moderado contenido de nódulos y bandas de pedernal negro. Mientras que la formación Teo Pc-Cgp. Piroclástico–Conglomerado Polimíctico cerca de la mina San Antonio está formada por una secuencia de estratos delgados de caliza crema de origen lacustre y limolita de color amarillo ocre que subyace a conglomerado polimíctico conformado por abundantes clastos de caliza negra y escasos de riolita, riolita porfídica, andesita y de pedernal negro, de estructura compacta y estratificación gruesa, cementados por una matriz arenosa ligeramente calcárea donde se observa cuarzo y calcita. Hacia la cima se presenta un horizonte de toba riolítica (Tellez, R. 2001). Estos datos permiten determinar que la roca encajonante, donde se encuentran las obras mineras se conforma principalmente de caliza con contenidos de silicatos.

Mineralización.- El depósito está clasificado como skarn metasomático, que consiste principalmente de chimeneas y estratos. La mineralización de beneficio corresponde a sulfuros de plomo, zinc, cobre y hierro, asociados con silicoaluminatos de calcio, hierro y manganeso. En la parte superior del depósito se presentan óxidos de plomo y zinc con valor económico que se beneficiaron hasta 1940.

La mineralización no es homogénea, sino que se encuentra en forma de bolsas o clavos de forma discontinua.

La mineralización económica en la zona de óxidos se compone principalmente de anglesita, casiterita, cerargirita, cerusita, smithsonita, vanadinita y zincita. Los minerales de ganga en esta zona son: actinolita, andradita, apatita, calcita, cuarzo, fluorita, grosularia, hedenbergita, hematita, hemimorfita, magnetita, wollastonita y yeso; de los cuales la calcita es la que podría tener mayor influencia en el pH del agua, por formar parte importante de la roca encajonante y porque, el relleno que pudo ser utilizado en ese tiempo, probablemente se caracterizó por la ausencia de sulfuros, evitando la generación de DA.

En la zona de sulfuros la mineralización económica se compone de calcopirita, esfalerita y galena, y los minerales de ganga asociados son actinolita, andradita, arsenopirita, calcita, cuarzo, epidota, fluorita, grosularita, hedenbergita, marcasita, pirita, pirrotita, tourmalina y tremolita (Moreno, L. 2016), de los cuales, la pirita y marcasita, dependiendo de sus concentraciones en el relleno, podrían ser los principales generadores de acidez, así como la calcita podría considerarse el principal mineral neutralizante por la cantidad que conforma la roca encajonante de esta zona de sulfuros.

A pesar de que actualmente los minerales sulfurosos conforman la mineralización económica, los datos sobre la ubicación de la zona de óxidos son importantes, porque sobreyacen a la zona de sulfuros mencionada y porque se relacionan con la presencia de agua, esto significa que, de acuerdo con la Figura 7.2, la zona de óxidos se relaciona con la zona no saturada, mientras que la parte saturada se relaciona con la presencia de los sulfuros (Tellez, R. 2001).

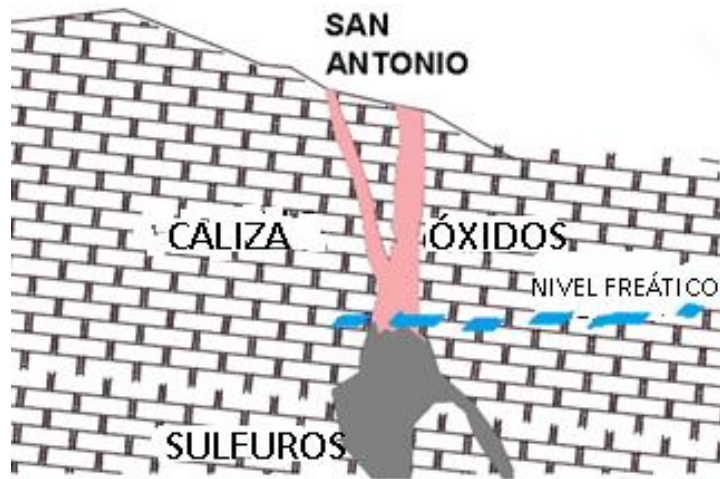


Figura 17. Mina San Antonio, columna estratigráfica (Tellez, R. 2001).

Sistema de minado.-Corte y Relleno Hidráulico (Peña, J. 1987) con jal o tepetate. Consiste en el cuele de una frente longitudinal para delimitar los extremos de un rebaje, a la vez que se van dando cruceros para conocer el ancho del cuerpo. Se inicia el desborde, respetando los pilares de diseño y simultáneamente se van colando contrapozos de ventilación y servicios, así como metaleras. Se cuele una rampa de acceso y servicio al rebaje desde el nivel inferior al superior.

Para el tumbado se efectúa el primer corte con altura de 3 m, quedando una altura de piso a cielo de 6 m; posteriormente se rellena dejando 2.5 m del piso de relleno al cielo para continuar con cortes hasta la terminación del rebaje en el nivel superior.

Para el relleno de las obras, el jal del proceso de beneficio es enviado al interior de la mina con 60% de sólidos a razón de 20 toneladas por hora. Para la decantación del agua en el rebaje se instalan canalones anillados de madera forrados con tela de yute para evitar el arrastre de sólidos hacia las piletas de bombeo.

Datos del beneficio (Moreno, L. 2016).-En la unidad minera "Santa Eulalia" se tienen datos de que se han beneficiado por medio de flotación dos tipos de minerales:

- Óxidos de plomo, plata y estaño
- Sulfuros para obtener concentrados de plomo, zinc y plata

Caracterización de los residuos.-La clasificación del tamaño de partículas se conforma por el 20% a +65 mallas (>0.25 mm) y 52 - 65% a -200 mallas (< 0.074 mm). La distribución granulométrica de los jales destinados para relleno hidráulico debe permitir un proceso de decantación eficiente.

De acuerdo con una evaluación de los jales hecha para la empresa IMMSA, y con base en las especificaciones de la NOM-141-SEMARNAT-2003, los valores de pH se encuentran en un valor promedio de 7.69 y 7.73 en muestras subsuperficiales, lo que indica que no tienen capacidad de generación de acidez. Además, estos jales pueden clasificarse como NO PELIGROSOS porque no

contienen contituyentes tóxicos solubles en concentraciones mayores a las establecidas en la norma, lo que se debe a los valores de pH neutro (CIMA 2009).

Finalmete, los jales de Santa Eulalia presentaron valores de PN/PA que varían de 1.53 a 3.51, con un promedio de 2.3, lo que indica que en función de sus potenciales de generación de acidez, pueden clasificarse como NO PELIGROSOS (CIMA 2009).

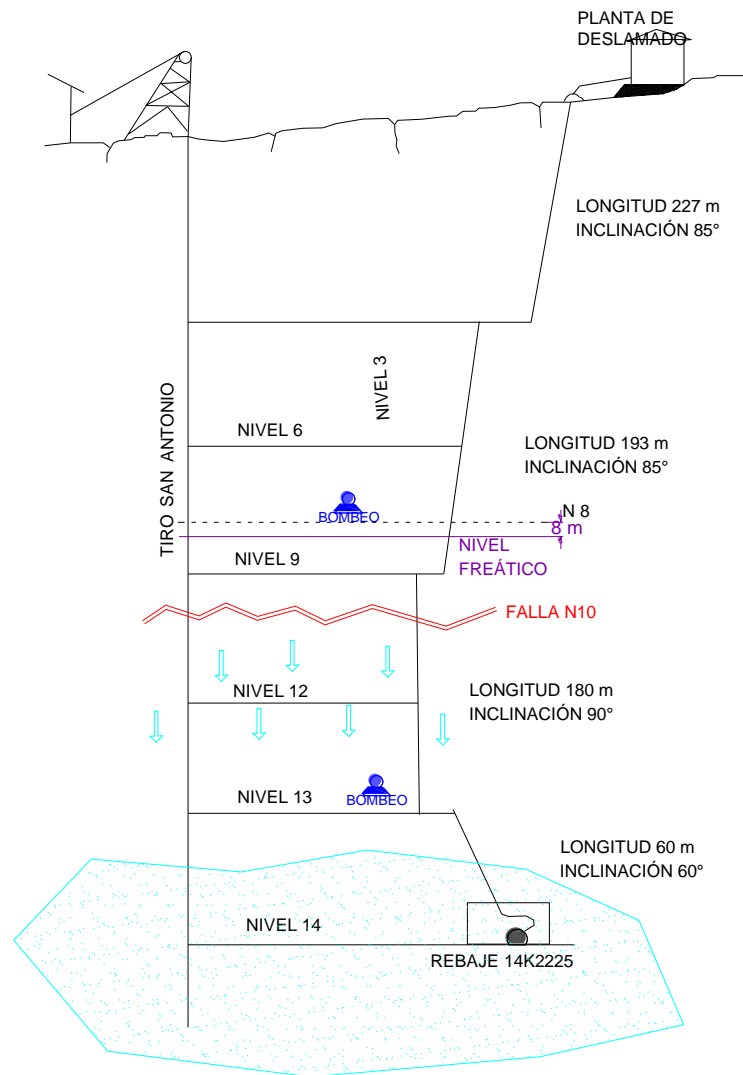


Figura 18. Esquema que representa el sistema de distribución de relleno hidráulico en mina Santa Eulalia, acompañado de la representación del flujo de agua y del sistema de bombeo (Peña, J. 1987).

Análisis General (Complemento).- La ganga del yacimiento, que se caracteriza por la ausencia de sulfuros en la zona de óxidos y por el bajo contenido de minerales como pirita, arsenopirita y pirrotita, frente a minerales como caliza y silicatos, coincide con los resultados de la evaluación de peligrosidad de los jales, en la que no se presentan potenciales de generación de acidez ni de movilización de EPT. Esto, en conjunto con la condición de que el macizo rocoso está constituido

principalmente por caliza y silicatos, conduce a la conclusión de que en esta mina, los jales generados son aptos para ser utilizados como relleno, a pesar de que existen fluctuaciones de los niveles de agua en la zona de la mina por el tipo de acuífero libre. Sin embargo, se podrían considerar los siguientes criterios para prevenir cualquier tipo de efectos relacionados con la presencia y el comportamiento del agua en la mina:

Colocar el relleno, preferentemente en la zona saturada y en la zona no saturada de la mina, pero no hacerlo en la zona de fluctuaciones del nivel de agua que se presenta, porque esa alternancia podría provocar el intemperismo del relleno y del macizo rocoso, lo que se podría reflejar en el arrastre de partículas en agua, debido también, al tipo de relleno utilizado bajo los efectos mecánicos del agua.

Se sabe que el tipo de relleno que se ha utilizado en esta mina es el hidráulico (con buenas características de permeabilidad que facilitan el drenaje del agua) y que existe una zona de intermitencia del nivel de agua, en la que el uso de relleno en pasta podría ser una alternativa para reducir el flujo de agua a través de sus poros, lo que podría resultar en un bajo intemperismo mecánico del relleno en esa zona.

Otra alternativa para evitar el intemperismo de los residuos en la zona de fluctuaciones del nivel de agua sería colocar el relleno y sellar las obras de accesos a los rebajes para evitar la entrada de agua y el posible intemperismo o arrastre de partículas.

7.2 Ejemplo 2 “Charcas”

Ubicación.- Estado de San Luis Potosí, México.

Fisiografía y Geomorfología.-El Distrito Minero Charcas se ubica en la porción centro-oriente de la provincia fisiográfica denominada “Mesa Central”, constituida por sierras de origen tectónico y valles intermontañosos de origen aluvial cubiertos por aluvión y caliche.

Estas sierras están compuestas principalmente de calizas cretácicas resistentes a la erosión, generalmente presentan perfiles redondeados y drenaje escaso.

Hidrología.-El municipio de Charcas se localiza en la región hidrológica de “El Salado”, que ocupa un lugar importante dentro del estado por el área que abarca (1 0817.92 km²). Pertenece a la Cuenca Presa San José - Los Pilares; y tiene dos subcuencas intermedias que son Presa Los Pilares y Presa San José.

El fuerte desequilibrio entre precipitación y evapotranspiración ocasiona que no existan escurrimientos superficiales de importancia, cuando más arroyos intermitentes.

Agua subterránea.-El cuerpo de agua subterránea que se tiene en la zona de Charcas pertenece al acuífero “Villa de Arista”, este se encuentra alojado en material aluvial y sedimentos lacustres. El espesor de este acuífero varía desde 50 a 250 m aproximadamente, es de tipo libre a semiconfinado, en el que tanto las fronteras laterales, como el piso rocoso se consideran impermeables, ya que corresponden a formaciones de naturaleza calcáreo-arcillosa. La recarga

tiene lugar principalmente en el borde occidental del valle, la extensión de esta zona de recarga es de aproximadamente 40 km. Los niveles estáticos varían desde los 15 hasta los 85 m de profundidad.

De acuerdo con Conagua-b (2015), el distrito minero Charcas, perteneciente a la formación “El Temeroso”, presenta el comportamiento de acuitardo (barrera impermeable), conformado por una litología de pórfido granítico a granodiorítico. Esto es un indicio de que en la zona minera podría existir poca infiltración de agua, aunque la presencia de obras mineras podría alterar esta condición.

Clima.- El clima característico de Charcas es semiárido. En la región donde se localiza la zona de estudio se reportan los siguientes datos climáticos para el periodo 1962 - 1999:

- La temperatura media anual es de 16.9 °C. En el mes de mayo se reporta la temperatura media más alta con un promedio de 21.8 °C, y en el mes de enero la temperatura más baja con un promedio 11.3 °C.
- La precipitación media anual es de 391.2 mm, siendo febrero el mes con menor captación (57.2 mm) y en julio el mes con mayor captación (582 mm).
- La evaporación potencial 1 941.9 mm anuales.

Geología.- Los depósitos minerales que se han extraído y beneficiado se identifican como cuerpos de sulfuros de reemplazamiento y relleno de fisuras en rocas de carbonatos que los alojan (Luna, L. 2008).

Los cuerpos de reemplazamiento ocurren como masa de mineral de forma irregular y se encuentran encajonados en calizas de la formación Cuesta del Cura, conservando su estratificación original, dándole a los cuerpos una apariencia bandeada en los que se observa una alternancia en los cuerpos de caliza con el mineral emplazado. Estos cuerpos de contacto se asocian con zonas de contacto con el intrusivo, ocasionando metamorfismo de contacto con la consecuente formación de las zonas de skarn.

Los yacimientos de relleno de fisuras son característicos de los yacimientos hipotermales y los cuerpos representativos son las vetas, siendo las más importantes las de Leones y Santa Isabel. Este grupo de vetas ocupa una zona de fallamiento en el contacto entre las calizas y la roca intrusiva y generalmente presentan pórfido en el alto y calizas en el bajo. Los depósitos originales estuvieron sujetos a los procesos de oxidación y enriquecimiento supergénico en la parte más superficial, que consistió en la solución y depósito de los minerales de plata, debido a la percolación de las aguas superficiales.

Estos datos indican que en la mina, la roca encajonante donde se encuentran las obras está constituida principalmente de rocas calizas.

Origen del yacimiento: Los yacimientos minerales del área mineralizada de Charcas se originaron de soluciones acuosas de sulfuros complejos derivados de un magma profundo, transportadas a través de fracturas y fallas regionales.

El yacimiento se hospeda en rocas carbonatadas del Jurásico-Cretácico y es aquí donde se depositan los cuerpos y vetas más ricos. Los otros cuerpos mineralizados de relleno de fisuras se alojan en lutitas y areniscas del Triásico Superior. De acuerdo con Martínez, M. (2000) estos cuerpos se encuentran a 130 m de profundidad, lo que coincide, de acuerdo con la columna estratigráfica, con la formación cuesta del cura.

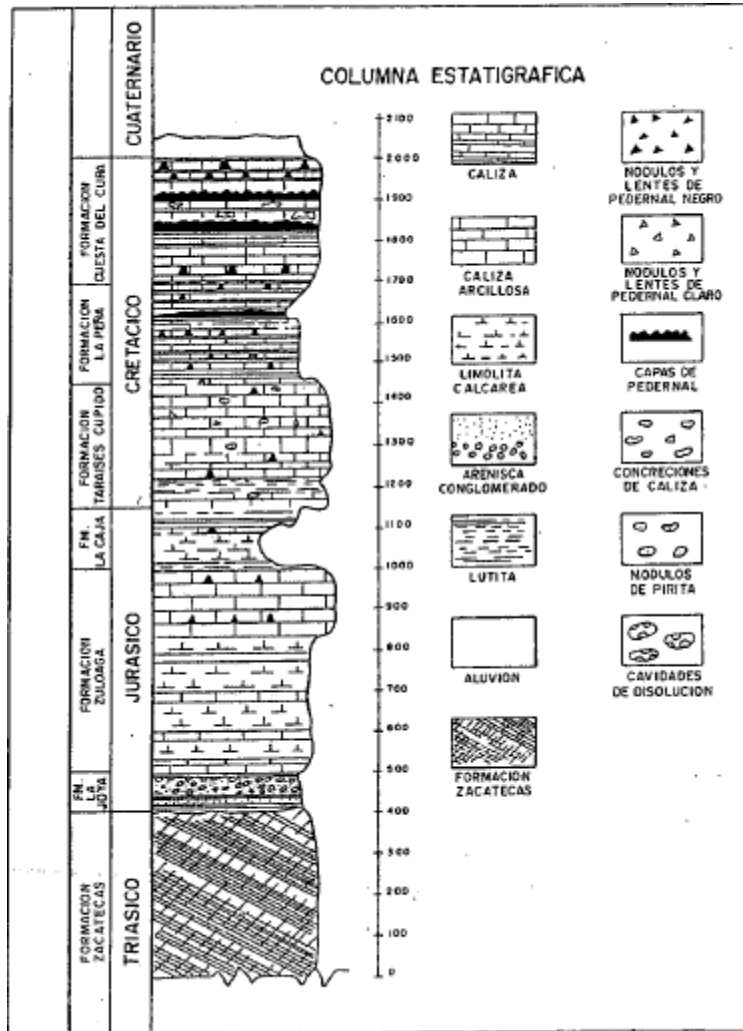


Figura 19. Columna estratigráfica de Charcas (Martínez, M. 2000).

Mineralogía.- Los minerales de mena identificados son: esfalerita (ZnS), galena (PbS), calcopirita ($FeCuS_2$) y argentita (Ag_2S). Entre los minerales de ganga se reportan pirita (FeS_2), arsenopirita ($FeAsS$), calcita ($CaCO_3$), cuarzo (SiO_2), diopsida ($CaMg(SiO_3)_2$), wollastonita ($CaSiO_3$), grosularita ($Ca_3Al_2(SiO_4)_3$), damburita ($CaB_2(SiO_4)_2$) (Luna, L. 2008).

De acuerdo con la información de Luna, L. (2008) y con el tipo de yacimiento, se puede determinar que en los jales y en el tepetate que son utilizados como relleno, podrían predominar

minerales consumidores de acidez o no reactivos (calcita, cuarzo, diopsida, wollastonita, grosularita y danburita) en comparación con los generadores, en los que predomina la pirita.

Sistema de minado.-Los métodos de extracción de mineral que se utilizan son el de cuartos y pilares con bancos descendentes, y el de corte y relleno hidráulico (jales gruesos) con pilares. También se usa tepetate como material de relleno.

El relleno hidráulico inicia desde la clasificación de las colas en arenas (gruesos) y lamas (finos), inyectando a la mina los gruesos con tamaños de +200 mallas a 80% y 74% de sólidos para dar características de percolación. El tepetate que se usa como relleno es proveniente de las obras de preparación pero es insuficiente para cubrir las necesidades de la mina. Al estar conformados tanto los jales como el tepetate por rocas no generadoras y consumidoras de DA, a pesar de que en las obras subterráneas existiera una importante cantidad de infiltración (condición que no se presenta), no se promoverían esos procesos a pesar de tener buena permeabilidad por las características químicas de los residuos. Sin embargo, el flujo de agua a través de ellos podría movilizar otros elementos, lo cual se podrá confirmar con una caracterización química.

Caracterización de los jales.-Los resultados de los análisis químicos indican que los jales de la Unidad Minera Charcas; se caracterizan por las altas concentraciones totales de EPT: As (225 -1493 mg/kg), Cd (33 – 1716.4 mg/kg), Pb (433 – 26824 mg/kg), Zn (2308 – 80072 mg/kg), Cu (213 – 6376 mg/kg) y Fe (3 15.29 %). Las concentraciones totales de Ba, Ag, Cr, Ni y V fueron muy bajas, y para Hg, Se, Be y Tl incluso fueron inferiores al límite de detección de la técnica de análisis.

Los jales estudiados se pueden clasificar como NO PELIGROSOS ya que no son generadores potenciales de acidez y no contienen elementos tóxicos solubles, dado que las concentraciones solubles de los EPT analizadas están por debajo del límite de detección de la técnica de análisis utilizada (Luna, L. 2008). Esto se puede deber, además de la mineralogía, a la poca cantidad de agua que se infiltra, como se mencionó en la descripción del agua subterránea de esta zona.

El pH en los jales varía entre 6.5 a 8.4, lo que significa que actualmente no hay generación de acidez y las pruebas de pronóstico de balance ácido-base indican que el potencial de neutralización excede el potencial de acidez entre 2.4 y 9.3 veces, lo que sugiere que en el futuro no se espera generación de DA.

Las bajas concentraciones solubles de los EPT en las muestras de jales indican que éstos están en formas de compuestos poco solubles que son químicamente estables y que por lo tanto, bajo las condiciones actuales, no representan un peligro para el ambiente (Luna, L. 2008).

Análisis General (Complemento).- De acuerdo con los datos obtenidos de Luna, L. (2008), se puede determinar que en la Unidad Minera “Charcas”, las condiciones climáticas tienen menos variaciones en cuanto a temperatura comparadas con Santa Eulalia. A pesar de que la precipitación es mayor, la infiltración de agua no es un factor importante que determine el intemperismo de los residuos mineros.

De hecho los residuos generados se caracterizan por no ser peligrosos, por no tener potenciales de generación de acidez ni de liberación de EPT, lo que se debe principalmente a su alto contenido de minerales neutralizantes. Por lo que pueden ser utilizados como relleno, sin necesidad de algún tipo de tratamiento preventivo o correctivo, cambios en el tipo de relleno utilizado, ni preocupaciones ambientales.

Además de la presencia de minerales neutralizantes en los residuos, la roca encajonante está formada también por ellos, lo que hace que independientemente de las condiciones climáticas presentes, no se promueva de manera considerable el intemperismo de los residuos. En éste caso, la “no peligrosidad de los residuos”, y la composición mineralógica del macizo rocoso de las obras mineras, hacen de ellos materiales aptos para implementar el relleno de minas sin efectos adversos sobre la calidad del agua.

7.3 Ejemplo 3 “Tizapa”

Ubicación.- Municipio de Zacazonapan, Estado de México.

Fisiografía y geomorfología.- La zona de estudio pertenece a la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur y a la sub-provincia Balsas-Mezcala. La geomorfología regional está formada por conos volcánicos como el cerro Pelón, mesetas formadas por coladas de basalto como la mesa de Tizapa, ambos productos de una actividad volcánica reciente. También se presentan formas dómicas como la del cerro el Sombrero y el cerro la Pila, así como cañadas formadas por ríos intermitentes

Hidrología.-El sistema de drenaje que se presenta en la zona es de tipo detrítico e intermitente, en el que destacan arroyos de fuertes pendientes, algunas veces interrumpidos por saltos hasta de 40 m. En épocas de lluvia se consideran como torrenciales. El arroyo principal es El Ahogado y lleva agua todo el año, una sección de él pasa al este de la mina. Hacia el norte, a este arroyo se le unen dos arroyos El Campanario, San José Tizapa y Arroyo Frío. El arroyo El Ahogado desemboca en el río Temascaltepec, y éste con el río Tilostoc forman el río Tuzantla, el cual es afluente del río Balsas que drena hacia el océano Pacífico (Isidro, M. 2014).

Agua subterránea.-Minera Tizapa se encuentra al norte del acuífero Temascaltepec, el cual se localiza en la región hidrológica N° 18 Río Balsas. Esta zona pertenece a la subregión Alto Balsas y está ubicado en la cuenca del Río Cutzamala. El tipo de acuífero se clasifica como libre, encajonado en tres litologías de permeabilidad diferente:

- a) Unidad 1.- Materiales de permeabilidad alta que constituyen zonas de recarga, compuesta de basaltos y depósitos aluviales
- b) Unidad 2.- Materiales de permeabilidad media que constituyen zonas de recarga por fracturamiento, conformada por rocas ígneas extrusivas de composición intermedia
- c) Unidad 3.- Materiales que constituyen zonas de barrera. En ella se agrupan las rocas metamórficas, en las que el fracturamiento es escaso y discontinuo. La permeabilidad puede ser baja a prácticamente nula.

La unidad hidrogeológica en la que se encuentra la mina corresponde a la unidad 3; sin embargo, de acuerdo con los estudios realizados por Isidro, M. (2014), se puede decir que el acuífero se aloja en rocas metamórficas, donde aparentemente presentan valores bajos de permeabilidad. Esto no sucede en toda el área, ya que en la mina se presenta un alto grado de fracturamiento en todas direcciones, considerando dos como preferenciales al NE y al NW. Por este motivo, no funcionan como una zona de barrera, sino como una zona en la que el agua está transitando. En la zona de Zacazonapan, la elevación del nivel estático es de 1350 msnm y varía conforme a la topografía (Conagua-a 2015).

Isidro, M. (2014) indica que el volumen de agua existente en la mina proviene en mayor proporción del acuífero y en menor medida de la infiltración de agua de la precipitación pluvial, y que las rocas en su estado natural están bien consolidadas, por lo que el flujo del agua se presenta en fracturas o en zonas de fallas donde se encuentra también la filita grafitica carbonatada, que además muestra un valor de permeabilidad alto comparado con el resto de las rocas.

Neri, M. (2014) realizó un esquema que relaciona la ubicación de las obras con respecto al acuífero, y reportó escurrimientos de DA que provienen de la zona de obras antiguas, rellenas con tepetate, cercanas a la superficie y que se encuentran debajo del acuífero que les transmite agua, además del agua de infiltración de la precipitación pluvial de la zona. Por otra parte también reporta presencia de agua neutra cuya fuente es el mismo acuífero que se presenta en el nivel 1100, la cual se transforma en DA a su paso por las obras mineras y por la mezcla con el DA.

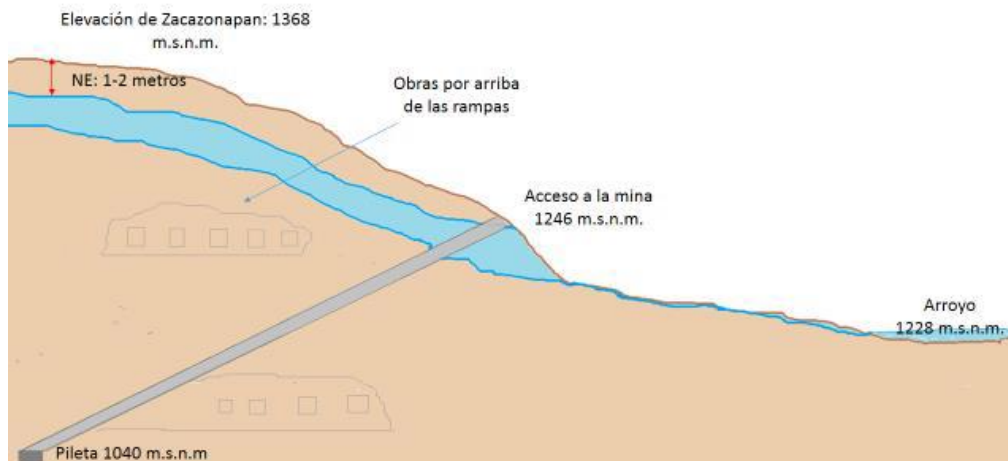


Figura 20. Esquema del acuífero con respecto a la mina (Neri, M. 2014).

Clima.-El clima predominante en Zacazonapan es de templado a cálido y se divide típicamente en las épocas de lluvias en verano y la época de secas en invierno, siendo los meses de julio, agosto y septiembre, los meses más lluviosos.

La temperatura de verano sobrepasa los 30 °C, la de invierno oscila entre 10 y 16 °C y la precipitación anual media es de 1,500 mm (Neri, M. 2014).

Geología.-La geología regional está constituida por la serie metamórfica Tejupilco, que data del Jurásico Tardío-Cretácico Temprano, formada por una asociación de filitas carbonosas, cuarcitas, esquistos de sericita, esquistos de clorita y un augen-gneis milonítico de composición granítica, conocido como metagranito de Tizapa; le subyace el Grupo Arcelia-Palmar del Cretácico, formado por calizas arcillosas interestratificadas con sedimentos terrígenos finos parcialmente filitizados, horizontes de arenisca y de sedimentos tobáceos, se encuentra cubierta por conglomerados del pre-Cuaternario de origen continental del grupo Balsas, flujos basálticos y depósitos conglomeráticos de tipo lacustres y aluviones del Cuaternario.

La geología del yacimiento de la unidad minera Tizapa es mayormente de Cuaternario, conformada por basalto sobre el que se encuentran depósitos lacustres y de talud, seguida de rocas del pre-Cretácico de origen metamórfico como filita gráfita y esquistos verdes o meta-andesitas. Las rocas en las que se alberga la mina pertenecen a la serie Tejupilco, en la que se presentan filitas carbonosas, meta-andesitas, meta-riolitas y el meta-granito de Tizapa.

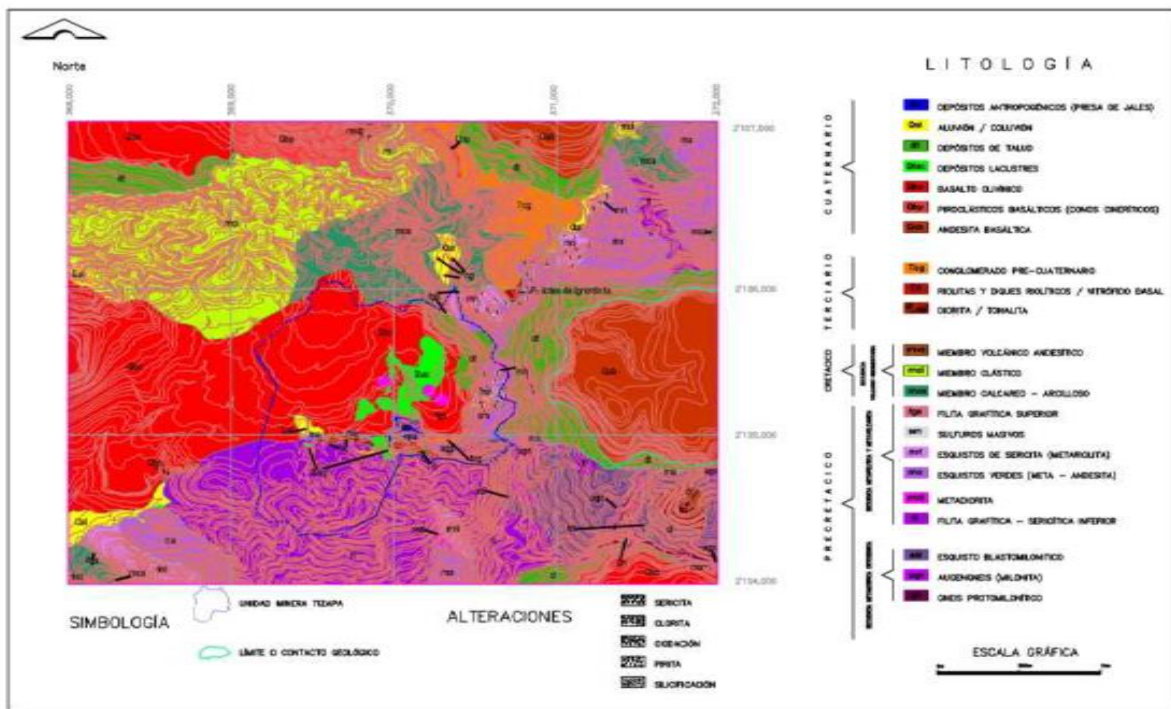


Figura 21. Geología de la mina Tizapa (Isidro, M. 2014).

Mineralogía.- La roca que predomina en la mina está integrada por sulfuros, esquisto de fluorita, esquisto de sericita, y por filita gráfita que tienen las siguientes características:

- Sulfuro.- Consiste en piritita de grano fino con bandas y diseminaciones de esfalerita, galena, arsenopiritita y calcopiritita
- Esquisto de clorita.- Se encuentra al bajo del mineral y se observa en la rampa Sur y acceso a los rebajes

- Esquisto de sericita.- Se presenta en contacto con el mineral
- Filita grafitica.- Se encuentra al alto del mineral en forma de capas que se alteran rápidamente a los cambios de temperatura y humedad comunes en el interior de la mina. Este material al absorber la humedad se expande y genera caídos de roca, por lo que es importante mantener la temperatura en las obras.

Los cuerpos minerales en Tizapa están constituidos por mantos cuya mineralización consiste principalmente de sulfuros, de los que el más abundante es pirita con un 78%, esfalerita 12%, galena 2.1% y calcopirita que es el sulfuro que se presenta en menor cantidad (Neri, M. 2014). Los principales minerales de ganga son cuarzo, sericita, muscovita, clorita, biotita, grafito, calcita, rutilo, turmalina y arsenopirita (Cervantes, A. 2014).

Como roca encajonante se encuentra la filita grafitica al alto y esquistos al bajo (Gatica, G. 2015).

Sistema de minado.-El método de minado utilizado es Salones y Pilares con relleno de tepetate que es traído de las obras de desarrollo, para rebajes grandes. Para llevar a cabo la explotación se desarrollan bloques de 50 a 75 m de nivel a nivel. El arreglo de pilares es de 5 x 5 m y las calles que quedan entre pilares son de 8 m de ancho. También se utiliza corte y relleno con cargado al alto para los rebajes delgados (Gatica, G. 2015). De acuerdo con esta información y la mineralogía descrita, se puede determinar que el tepetate se podría estar conformado principalmente por esquistos sin potenciales de neutralización. La presencia de pirita en el yacimiento, permite considerar que es la fuente del DA que ya se observa en la mina.

Caracterización de las rocas.- En el caso de las filitas y calizas presentes en la minas se determinaron altos contenidos de carbonato y potenciales de neutralización, a diferencia de los esquistos que no presentaron dichos potenciales. Además de existir DA y agua neutra, la principal preocupación es la presencia de metales disueltos como el Zn en ambos tipos de agua (Cervantes, A. 2014).

Por otra parte, de acuerdo con la mineralogía del yacimiento, la pirita podría estar conformando la proporción más abundante en los jales generados del beneficio metalúrgico, y se sabe que la oxidación de este mineral, bajo condiciones de presencia de oxígeno y agua, es la principal fuente de generación de DA, lo que debe contemplarse con importancia, si en algún caso se desean implementar los jales como material de relleno.

Análisis General (Complemento).- De acuerdo a los estudios realizados en Tizapa, se puede asumir que los jales tienen potenciales de generación de acidez por su alto contenido de pirita. Además, se conoce que las condiciones presentes en las obras, como son la presencia de agua y oxígeno, también favorecen su formación. Bajo estas condiciones, en primera instancia los jales generados en esta mina no son aptos para ser utilizados como relleno de las obras subterráneas por sus contenidos de pirita.

El tepetate que se utiliza como relleno está conformado por minerales que no promueven la generación de acidez, y puede ser utilizado como relleno sin esperar tal efecto, salvo en las zonas en las que se presenta diseminación de pirita en la roca encajonante.

La condición de que la roca encajonante se conforma de caliza y filita, que tienen potenciales de neutralización, podría considerarse como una alternativa para la disposición de los residuos sulfurosos dentro de las obras. Sin embargo, habría que evaluar los balances de generación de acidez y neutralización, entre las obras y el relleno, para determinar si la capacidad de neutralización de las rocas neutralizantes es suficiente para contrarrestar los efectos de generación de acidez de los residuos.

Las posibles recomendaciones que se podrían proponer en este caso para la utilización de residuos sulfurosos, serían la colocación de jales en pasta cementados lo que además de proporcionar estabilidad a la mina, sería una buena estrategia para incrementar la recuperación del mineral de interés, por el método de minado que se utiliza, que es salones y pilares. Desde una perspectiva ambiental, el uso de relleno en pasta reduciría la permeabilidad de los residuos, por lo que se vería reducida la generación de DA comparada con la que se generaría utilizando otro tipo de relleno.

El efecto de reducción DA y la mejora en la estabilidad de las obras, también se verían reflejados si se utilizara el tepetate que se emplea, pero como relleno cementado.

Los efectos de cualquiera de las dos alternativas anteriores (relleno en pasta con jales cementados, o con tepetate cementado), se verían mejorados a través del control de los escurrimientos de agua por medio de obras de canalización, en superficie y a lo largo de las obras subterráneas; o por el aislamiento de obras con materiales impermeables o neutralizantes.

8. CONCLUSIONES

Este trabajo permitió realizar un análisis de los factores y parámetros involucrados en los posibles efectos ambientales que podrían presentarse por el uso de residuos mineros como relleno de minas subterráneas.

La mineralogía de los residuos mineros es el principal factor que determina su estabilidad química, y por lo tanto, su capacidad para ser utilizados como relleno.

La presencia de agua en la mina, las características de los acuíferos en la zona, las características mineralógicas de la roca encajonante y la ubicación de las obras, también son factores que influyen en los procesos de generación de DA y movilización de EPT contenidos en el yacimiento, que se podrían generar si existiese la posibilidad de que los residuos tuvieran dichos potenciales. Los criterios que deben ser considerados, porque en conjunto permiten analizar la forma en la que se podría presentar la interacción del relleno con el agua de la mina y determinar los métodos de control que podrían utilizarse para evitar efectos ambientales, son:

- Características de los residuos que conformarán el relleno
- Características de acuíferos en la zona minera
- Características de las operaciones y obras mineras
- Características climatológicas del sitio

Estos criterios son los que deberían ser contemplados en la elaboración de una nueva norma oficial mexicana que regule las actividades de relleno de minas, desde una perspectiva ambiental, a las que se refiere el Artículo 34 del Reglamento de la LGPGIR.

Los procesos de intemperismo del relleno, sus posibles efectos mencionados anteriormente y los factores que influyen en ellos, justifican que las actividades de relleno de minas con residuos, tampoco deberían estar excluidas en el Artículo 5, inciso L, punto III del Reglamento de la LGEEPA de requerir las autorizaciones en materia de impacto ambiental para ser llevadas a cabo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abarca, J. (2011). Flotación de Minerales. UNJFSC. Huacho, Perú.
- Azareño, A., Núñez, P., Aramburú, V., León, E., Quiñones, L., Cabrera, M., Santibañez, L., Díaz, C., Cerrón, J. y Alarcón, J. (2009). Factores que afectan la selección del proceso metalúrgico para beneficiar minerales complejos de oro. *Revista del Instituto de Investigaciones* 12 (24):49-55.
- Baquero, J. (1998). Modelización hidrogeológica en minería. Aplicación a drenaje de minas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Belem, T. y Benzaazoua, M. (2004). An overview on the use of paste backfill technology as a ground support method in cut-and-fill mines. Proceedings of the 5th Int. Symp. on Ground support in Mining and Underground Construction. Perth, Australia.
- Benzaazoua, M., Fall, M. y Belem, T. (2004). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill. *Minerals Engineering* 17: 141-152.
- Biswas, A. y Davenport, W. (1993). El Cobre. Metalurgia extractiva. LIMUSA. México.
- Cervantes, A. (2014). Caracterización del drenaje ácido y de las rocas asociadas a una mina para evaluar su posible aplicación en un sistema de tratamiento pasivo. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.
- Chaparro, L. (2015). Drenajes Ácidos de Mina Formación y Manejo. *ESAICA* 1(1): 53-57.
- Chica, L., Ospina, M. y Bustamante, O. (2012). Uso de CFD para la simulación de procesos mineralúrgicos de concentración gravimétrica. *Prospect* 10 (1): 85-96.
- Choudhary, B. y Kumar, S. (2013). Underground void filling by cemented mill tailings. Dhanbad, India. Elsevier. *International Journal of Mining Science and Technology* (23): 893-900.
- CIMA (2009). Evaluación de la peligrosidad de los jales de la mina Santa Eulalia, Chih., de acuerdo a la NOM-141-SEMARNAR-2003. Consultoría e Investigación en Medio Ambiente, S.C. México.
- Conagua-a. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Temascaltepec (1509), Estado de México. Comisión Nacional del Agua. Diario Oficial de la Federación del 20 de abril de 2015.
- Conagua-b. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Villa de Arista (2408), Estado de San Luis Potosí. Comisión Nacional del Agua. Diario Oficial de Federación del 20 de abril de 2015.
- Conejeros, V. (2003). Procesamiento de minerales. Universidad Católica del Norte. Antofagasta, Chile.
- CYTEC (2002). Mining Chemicals Handbook. Cytec Industries Inc. USA.
- Dana, D. y Hurlbut, C. (1960). Manual de Mineralogía. 2 ed. Reverté S.A. México.

Department of Minerals and Energy. (1998). Guidelines on the development of an operating manual for tailings storage. Government of Western Australia.

Department of Mines and Petroleum. (2013). Tailings storage facilities in Western Australia – code of practice. Australia Resources Safety and Environment Divisions.

Duruibe, J., Ogwuegbu, M. y Egwurugwu, J. (2007). Heavy metal pollution and human biotoxic effects. International Journal. Nigeria. Academic Journals. *International Journal of Physical Sciences* 2 (5): 112-118.

Encinas, M. (2016). Tratamiento de residuos y jales de procesos de cianuración. *Geomimet* 320: 15-21.

Ercikdi, B., Kesimal, A., Cihangir, F., Deveci, H. y Alp I. (2009). Cemented paste backfill of sulphide-rich tailings: Importance of binder type and dosage. *Cement and Concrete Composites* 31: 268-274.

Espino, V. (2014). Afectación de suelos y sedimentos por la dispersión de los residuos mineros históricos del distrito minero San Antonio – El Triunfo, B.C.S. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería UNAM. México, D.F.

Espinoza, G. (2012). Recuperación de Cu a partir de soluciones neutras de Sulfato de Amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, por medio de procesos de cementación. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.

Fernández, R. y Gutiérrez, A. (1995). Mining Drainage and Water Supply under Sustainable Constraints. International Mine Water Association. Madrid, España.

Gatica, G. (2015). Implementación de un sistema de fortificación en obras de desarrollo y rebajes, en minera Tizapa. Informe profesional. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.

Grice, T. (2014). Mine backfill. A cost centre or an optimisation opportunity?. AMC Consultants Pty Ltd. Australia.

Hartman, H. y Mutmanský, J. (2002). Introductory mining engineering. John Wiley & Sons. Nueva Jersey, USA.

Hernández, J. (2015). Evaluación de la eficiencia de neutralización de drenaje ácido y remoción de metales pesados, mediante pruebas de agitación con rocas carbonatadas. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.

Hustrulid, W. y Bullock, R. (2001). Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.

Isidro, M. (2014). Determinación de infiltración en suelo y permeabilidad y fracturamiento en roca para conocer patrones de escurrimiento de agua en la mina Tizapa. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.

- Iturbe, R. y Silva, A. (1992). Agua Subterránea y Contaminación. Instituto de ingeniería, UNAM. México.
- Jennings, S., Neuman, D. y Blicher, P. (2008). Acide Mine Drainaje and Effects on Fish Health and Ecology: A Review. Reclamation Research Group. Bozeman, USA.
- Lee, G., Bighamb, J. y Faure, G. (2002). Removal of trace metals by coprecipitation with Fe, Al and Mn from natural waters contaminated with acid mine drainage in the Ducktown Mining District, Tennessee. *Applied Geochemistry* 17 (5): 569-581.
- Livni, N., Avisar, D. y Mamane, H. (2015). Manual de muestreo, técnicas de parámetros in situ y estrategias de monitoreo para la vigilancia del agua subterránea. Comisión Nacional del Agua y Tel Aviv University. México.
- López, V. (1994). Manual para la selección de métodos de explotación de minas. Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- López, V. (2008). Fundamentos para la explotación de minas. Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- López, E., Aduvire, O. y Baretino, D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero* 113 (1): 3-21.
- López, J., Fornés, J., Ramos, G. y Villarroya, F. (2009). Las aguas subterráneas: un recurso natural del subsuelo. 4ed. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- López, L. (2013). Residuos mineros y la generación de drenaje ácido: pruebas de laboratorio y su aplicación en el diseño, construcción y operación de depósitos. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.
- Lottermoser, B. (2007). Mine Wastes. Characterization, Treatment and Environmental Impac. 2ed. Springer-Verlag. Berlín.
- Luna, L. (2008). Mineralogía y geoquímica de los jales de la Unidad Minera Charcas, San Luis Potosí. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.
- MAC. (1998). A Guide to the Management of Tailings Facilities. Mining Association of Canada. Ontario, Canadá.
- MAC. (2006). Paste Backfill Geochemistry: Environmental Effects of Leaching and Weathering. Mining Association of Canada. Vancouver, Canadá.
- MAC. (2011). Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities. Mining Association of Canada. Ontario, Canadá.
- Martínez, M. (2000). Explotación del cuerpo "Las Eulalias", Charcas, SLP. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. México D.F.

Mining, Minerals and Sustainable Development. (2002). Mining for the Future. Appendix: A: Large Volume Waste Working Paper. International Institute for Environment and Development. (31).

Moreno, L. (2016). Comportamiento ambiental de residuos mineros. Tesis de maestría. UASLP. San Luis Potosí.

Neri, M. (2014). Medición del volumen de drenaje ácido generado en la mina Tizapa y propuesta de manejo para su posterior tratamiento. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.

Newman, P., Brown, R. y Landriault, D. (2000). Evident Trends in the Pipeline Transport of Paste Backfill. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Toronto, Canadá.

Pavez, O. (2005). Apuntes de concentración de minerales II. Universidad de Atacama. Chile.

Peña, J. (1987). "Santa Eulalia". Minas Mexicanas. Tomo 3. American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers. México.

Pérez, A. y Mendoza, J. (2007). Mesa vibradora para concentración de metales auríferos. *8o Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*. Cuzco, Perú.

Rodríguez, M. y Espinoza, G. (2002). Gestión ambiental en América Latina y el Caribe: Evolución, tendencias y principales prácticas. Banco Interamericano de Desarrollo. Nueva York.

Rojas, E. (2010). Tecnologías y técnicas para el relleno en pasta e hidráulico. Manejo y abandono de relaves mineros. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

Romero, F., Armienta, M., Gutiérrez, M. y Villaseñor, G. (2008). Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 24 (2): 43-54.

Safe Work Australia. (2011). Ground control for underground mines. DRAFT. Australia.

Salas, É. (2014). Geoquímica y mineralogía de jales en Mina Aurora , Xichú, Guanajuato. Tesis de Maestría. UNAM. México, D.F.

Semarnat. (1988). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación del 28 de enero de 1988.

Semarnat. (2003). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación del 8 de octubre de 2003.

Semarnat. (2004). *Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación del 13 de septiembre de 2004.

Semarnat. (2006). *Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación del 30 de noviembre de 2006.

Semarnat. (2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007, Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación del 15 de enero de 2010.

Semarnat. (2011). *Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación del 30 de agosto de 2011.

Semarnat. (2012). *Norma Oficial Mexicana NOM-159-SEMARNAT-2011, Que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación del 13 de febrero de 2012.

Semarnat. (2015). *Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del Acuífero Aldama-San Diego, clave 0836, en el Estado de Chihuahua, Región Hidrológico-Administrativa Río Bravo*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación del 1 de julio de 2015.

Sheshpari, M. (2015). A review of underground mine backfilling methods with emphasis on cemented paste backfill. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 20 (13): 5183-5208.

Sivakugan, N., Rankine, R. M., Rankine, K. J., y Rankine, K. S. (2006). Geotechnical considerations in mine backfilling in Australia. *Journal of cleaner production* 14: 1168-1175.

Tellez, R. (2001). Problemática operacional de la mina San Antonio y sustitución del sistema de bombeo de agua unidad Santa Eulalia Chihuahua, Chih. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.

Tovar, J. (2017). El agua subterránea en el medio ambiente minero y su importancia en los planes de cierre. Ministerio de Energía y Minas. Lima, Perú.

Vadillo, L. (1995). Manual de reutilización de residuos de la Industria Minera, Siderometalúrgica y Termoeléctrica. Rivadeneyra S.A. Madrid, España.

Valderrama, L., Santander, M., Zazzali, B. y Carmona, M. (2014). Concentración magnética aplicada a relaves de cobre. *Holos* 6 (30): 37-44.

Werner, J. (1996). Introducción a la Hidrogeología. UANL. Linares, Nuevo León.

Wolkersdorfer, C. (2008). Water management at abandoned flooded underground mines. Springer. Alemania.

Younger, P., Banwart, S. y Hedin, R. (2002). Mine Water. Hydrology, Pollution, Remediation. Springer Science Business Media, B.V. Reino Unido.

Yao, Y., Cui, Z. y Wu, R. (2012). Development and Challenges on Mining Backfill Technology. *Journal of Materials Science Research* 1 (4): 73-78.

Mesografía:

Areaciencias (2017). Aguas Subterráneas. Consultado el 29 de octubre de 2017, en:
<http://www.areaciencias.com/ecologia/aguas-subterranas.html>

Armienta, M. y Rodríguez, R. (2016). Metales y metaloides. Estudio de caso: Contaminación por arsénico en el agua subterránea de Zimapán, Hidalgo; problemática ambiental y enfoque metodológico. Consultado el 16 de febrero de 2016, en:
http://bidi.unam.mx/libroe_2007/1013589/A08.pdf

Broggi, I. (2015). Lixiviación. Fundamentos y Aplicaciones. Consultado el 09 de septiembre de 2015, en:
<https://hydrometallurgyperu.wordpress.com/lixiviacion-en-pilas/>

Brown, R. (2014). Backfilling in the underground mining industry. Consultado el 29 de marzo de 2017, en:
<https://es.slideshare.net/mysiteWW/backfilling-in-the-underground-mining-industry>

Cheminova. (2016). Minería. Consultado el 24 de octubre de 2016, en:
<http://www.danafloat.com/es/index.html>

Codelco Educa. (2016). Fundamentos de la Flotación. Consultado el 24 de octubre de 2016, en:
https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_flotacion.asp

Department of Economic Development. (2015). Management of Tailings Storage Facilities. Consultado el 9 de marzo de 2017, en:
<http://earthresources.vic.gov.au/earth-resources-regulation/licensing-and-approvals/minerals/guidelines-and-codes-of-practice/management-of-tailings-storage-facilities>

Dominic, E. (2016). Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones. Consultado el 28 de octubre de 2016, en:
<https://es.scribd.com/document/59992340/Contexto-y-Practica-de-La-Lixiviacion>

Environment Canada. (2009). *Environmental Code of Practice for Metal Mines*. Consultado el 7 de marzo de 2017, en:
<https://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/documents/codes/mm/mm-eng.pdf>

Espinoza, F. y López, L. (2006). *Geoquímica de Elementos Traza*. Consultado el 19 de febrero de 2017, en:
https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2006/2/GL45C/1/material_docente/

European Commission. (2009). *Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities*. Consultado el 6 de septiembre de 2017, en:
http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/mmr_adopted_0109.pdf

International Network for Acid Prevention (2017). Executive Summary. Consultado el 30 de agosto de 2017, en:
<http://www.gardguide.com/index.php/>

Instituto Geológico y Minero de España. (2017). Composición química de las aguas subterráneas naturales. Consultado el 13 de octubre de 2017, en:
http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1_1.pdf

Masniyom, M. (2009). *Systematic Selection and Application of Backfill in Underground Mines*. Consultado el 24 de marzo de 2017, en:
<http://tubaf.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/2277/GeotechnikBergbauMasniyomManoon441823.pdf>

Michaud, D. (2016). *Magnetic Separators. 911 Metallurgy Corp.* Consultado el 09 de mayo de 2016, en:
<https://www.911metallurgist.com/blog/laboratory-magnetic-separators>

Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas*. Consultado el 03 de febrero de 2017, en:
<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/manedrenaje.pdf>

MiningInfo. (2017). *Mine Backfill*. Consultado el 05 de abril de 2017, en:
<https://sites.google.com/site/mininginfosite/miner-s-toolbox/backfill>

Salazar, A. (2017). *¿Qué es una Puzolana?* Consultado el 29 de octubre de 2017, en:
<http://www.ecoingenieria.org/docs/Puzolanas.pdf>

Salazar, C. (2011). Concentración Magnética. Consultado el 14 de noviembre de 2016, en:
<https://es.slideshare.net/ChrissSalazar/03-concentracionmagnetica>

South African Bureau of Standards. (1998). Code of Practice. Mine residue. Consultado el 9 de marzo de 2017, en:
<http://docslide.net/documents/sans-10286.html>

Wassan, A. (2014). *Mineral Processing-II*. Consultado el 14 de noviembre de 2016, en:
<http://www.slideshare.net/aliwassan9/mineral-processing-ii-33633877>

Yilmaz, E., Belem, T., Benzaazoua, M., Kesimal, A., Ercikdi, B. y Cihangir, F. (2011). *Use of high-density paste backfill for safe disposal of copper/zinc mine tailings*. Consultado el 9 de marzo de 2017, en:
<https://www.minpan.krakow.pl/pliki/czasopisma/gospodarka%20surowcami%20mineralnymi/GSM2011/3/yilmaz-i-inni.pdf>