



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

ASPECTOS GEOTÉCNICOS Y AMBIENTALES EN OPERACIONES MINERAS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JUAN SANDINO SANABRIA PÉREZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. ALBERTO JAIME PAREDES
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX., AGOSTO 2018

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. BOTERO JARAMILLO EDUARDO

Secretario: DR. FLORES CASTRELLÓN OSVALDO

Vocal: DR. JAIME PAREDES ALBERTO

1^{er.} Suplente: M.I. MARTÍNEZ MIER JAIME ANTONIO

2^{do.} Suplente: DRA. LÓPEZ ACOSTA NORMA PATRICIA

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: POSGRADO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. JAIME PAREDES ALBERTO

FIRMA

Dedicatoria

*A mis padres Ranulfo Juan Sanabria Lévano y
Leonidas Luz Pérez Baltazar.*

A mis hermanos Milton, Enrique, Paul y Luz María.

A mi abuela Elisa Baltazar.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, por la formación académica y profesional brindada.

Al Dr. Alberto Jaime Paredes, por sus enseñanzas, consejos, paciencia y por inculcarme el respeto, cuidado y protección del medio ambiente.

A la Dra. Norma López, al Dr. Eduardo Botero, al Dr. Osvaldo Flores y al M.I. Jaime Martínez, por sus comentarios, aportes y disposición durante el desarrollo y revisión de esta tesis.

A la Minera Nyrstar S.A., en especial al Ing. Pedro Quiroz, por brindarme y permitirme emplear información para el desarrollo del ejemplo de aplicación.

Al Dr. Venancio Trueba, por sus sugerencias y comentarios en la realización de esta tesis.

Al Dr. Ramón Verdugo, por su disposición en brindarme información técnica.

Al M.I. Mauricio Bernal, por su apoyo y sugerencias.

Al M.I. Guerry Martel, por el apoyo en la información técnica y ambiental.

Al programa CONACYT, por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

A mis compañeros: Jorge Carrillo, Osman Perafán, Héctor Castro, Geovaní García, José Luis Aguirre, Felipe Jiménez, Carlos Aguilar, Marcial Córdova, Eduardo Jiménez, Eduardo Álvarez, Damián López, Enrique Castañeda, Gianella Valencia, Adriana Ávalos, Josefina Barrera, Carmen Cano, Mónica Martínez y Andrea García, quienes me brindaron su amistad y apoyo incondicional.

¡Jilatxi!

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	
ABSTRACT	
1 INTRODUCCION	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Alcances	3
2 EXPLOTACIONES MINERAS	5
2.1 Generalidades	5
2.2 Impacto socio-económico	7
2.2.1 México	7
2.2.2 Perú	7
2.2.3 Chile	8
2.2.4 Canadá.....	8
2.2.5 Estados Unidos	8
2.2.6 Australia.....	9
2.2.7 Sudáfrica	9
2.3 Tipos de explotación y procesamiento de minerales	10
2.3.1 Minería superficial	10
2.3.2 Minería subterránea	12
2.3.3 Minería en estado de desarrollo	16
2.3.4 Procesamiento de minerales	17
2.4 Residuos mineros	21
2.4.1 Origen, producción y tipos de residuos mineros	21
2.4.2 Propiedades químicas, físicas y mecánicas de los residuos mineros	27
3 DISPOSICIÓN Y DISEÑO DEL ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS MINEROS	29
3.1 Tipos de almacenamiento de residuos mineros	29
3.1.1 Almacenamiento superficial.....	29
3.1.2 Almacenamiento en minas a cielo abierto y mina subterránea	31
3.1.3 Almacenamiento acuático	32
3.2 Diseño de depósitos de residuos mineros	32
3.2.1 Variables de diseño	34
3.2.2 Métodos de construcción con residuos mineros y método convencional.....	36

3.2.3 Métodos de descarga en depósitos de relaves	39
3.2.4 Tipos de disposición de relaves	40
3.2.5 Métodos combinados de disposición.....	41
3.3.6 Criterios de diseño para cierre	42
4 NORMATIVAS AMBIENTALES DE AGUA, AIRE Y SUELO EN MÉXICO Y OTROS PAÍSES	43
4.1 México	45
4.1.1 Agua	45
4.1.2 Aire	46
4.1.3 Suelo	48
4.2 Canadá	49
4.2.1 Agua	50
4.2.2 Aire	51
4.2.3 Suelo	51
4.3 Estados Unidos	52
4.3.1 Agua	52
4.3.2 Aire	53
4.3.3 Suelo	54
4.4 Perú	55
4.4.1 Agua	55
4.4.2 Aire	56
4.4.3 Suelo	58
4.5 Chile	58
4.5.1 Agua	58
4.5.2 Aire	60
4.5.3 Suelo	61
4.6 Unión europea	62
4.6.1 Agua	62
4.6.2 Aire	62
4.7 Sudáfrica	63
4.7.1 Agua	63
4.7.2 Aire	64
4.7.3 Suelo	64
4.8 Australia	64
4.8.1 Agua	64

4.8.2 Aire	66
4.8.3 Suelo	66
4.9 Banco mundial	66
4.9.1 Agua	66
4.9.2 Aire	67
4.9.3 Suelo	67
4.10 Comparativo de normas ambientales	68
5 ASPECTOS GEOTÉCNICOS PARA EL DISEÑO DE DEPÓSITOS MINEROS	73
5.1 Consideraciones previas.....	73
5.2 Exploración geotécnica en depósitos de residuos	73
5.3 Características geotécnicas de los residuos mineros	77
5.3.1 Propiedades índice.....	77
5.3.2 Permeabilidad.....	81
5.3.3 Características de resistencia al esfuerzo cortante.....	82
5.4 Comportamiento mecánico de relaves	85
5.4.1 Proceso de consolidación de relaves	85
5.4.2 Influencia de la viscosidad en la resistencia de relaves	86
5.4.3 Relaves parcialmente saturados	87
5.4.4 Compactación de relaves	89
5.5 Licuación de residuos mineros	90
5.5.1 Comportamiento contractivo y dilatante de relaves.....	93
5.5.2 Resistencia cíclica de relaves	94
5.6 Comportamiento del enrocamiento.....	96
5.7 Comportamiento mecánico de mezcla de relaves y rocas de desecho.....	97
5.8 Resistencia al corte en interfases de los residuos mineros	98
5.9 Efecto del envejecimiento de los residuos mineros.....	99
5.10 Flujo de agua en residuos mineros.....	100
5.11 Estabilidad de taludes	106
6 MODOS DE FALLA EN DEPÓSITOS MINEROS Y REMEDIACIÓN.....	109
6.1 Algunas fallas en depósitos mineros.....	109
6.2 Modos de falla y trabajos de remediación.....	113
7 ASPECTOS DE CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y DE CIERRE DE DEPÓSITOS MINEROS.....	119
7.1 Monitoreo y control de calidad en depósitos mineros	119
7.2 Cierre de depósitos mineros.....	126

8 ASPECTOS AMBIENTALES	127
8.1 Aspectos ambientales de diseño	127
8.2 Aspectos ambientales de operación y de cierre	130
8.2.1 Impactos ambientales.....	131
8.2.2 Tratamiento y remediación	132
8.2.3 Monitoreo ambiental	132
8.2.4 Control de contaminantes y remediación	133
9 EJEMPLO DE APLICACIÓN GEOTÉCNICO - DEPÓSITO DE RELAVES OASIS	135
9.1 Resumen ejecutivo	135
9.2 Topografía.....	136
9.3 Infraestructura del depósito.....	137
9.4 Clima e Hidrología.....	138
9.5 Hidrogeología	138
9.6 Geología.....	140
9.7 Geotecnia.....	142
9.8 Sismicidad	149
9.9 Instrumentación geotécnica existente.....	149
9.10 Análisis geotécnico	149
9.11 Estabilización del depósito y plan de monitoreo.....	155
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	157
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	159

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Métodos de minado superficial con extracción mecánica	10
Tabla 2.2: Métodos de minado superficial con extracción por medio de agua	11
Tabla 2.3: Métodos de minado sin soporte.....	13
Tabla 2.4: Métodos de minado con soporte	15
Tabla 2.5: Métodos de minado por hundimiento	16
Tabla 2.6: Tipos de minería en estado de desarrollo	17
Tabla 2.7: Procesos en la obtención de minerales de beneficio	18
Tabla 2.8: Tipos de residuos mineros producidos en una explotación minera.....	22
Tabla 2.9: Producción de residuos por tipo de explotación minera	24
Tabla 2.10: Producción de residuos por tipo de tratamiento	25
Tabla 2.11: Categorías de efluentes líquidos según el nivel de pH	25
Tabla 2.12: Características físicas de relaves	26
Tabla 2.13: Tipos de relaves según el contenido de agua	26
Tabla 2.14: Propiedades químicas y físicas de residuos	27
Tabla 3.1: Almacenamiento tipo embalse	30
Tabla 3.2: Criterios y bases de diseño de depósitos de residuos	33
Tabla 3.3: Componentes típicos de depósitos mineros.....	33
Tabla 3.4: Condiciones específicas de sitio	35
Tabla 3.5: Tipos de métodos de construcción de depósitos.....	36
Tabla 3.6: Comparación de depósitos de relaves	38
Tabla 3.7: Métodos de descarga en depósitos de relaves	39
Tabla 3.8: Contenido de agua y peso volumétrico de relaves según el tipo de descarga..	40
Tabla 3.9: Métodos de disposición de relaves	40
Tabla 3.10: Tipos de cierre de depósitos mineros.....	42
Tabla 4.1: Categoría de contaminantes	43
Tabla 4.2: Tipo de contaminantes presentes en las descargas de residuos de mina	44
Tabla 4.3: Niveles máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos - México ...	46
Tabla 4.4: Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas - México	47
Tabla 4.5: Límite máximo permisible para la emisión de ruido, en dBA - México	48
Tabla 4.6: Normas mexicanas que regulan el manejo de residuos sólidos - México.	48
Tabla 4.7: Pruebas para determinar la peligrosidad - México.	48
Tabla 4.8: Niveles máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto líquidos PECT y base seca - México	49
Tabla 4.9: Límites para determinar la peligrosidad por el potencial de generación de drenaje ácido - México	49
Tabla 4.10: Normas para emisión de contaminantes en efluentes líquidos por Provincia en Canadá.	50
Tabla 4.11: Niveles máximos permisibles para descarga final a agua marinas y dulces en British Columbia - Canadá	50
Tabla 4.12: Niveles máximos permisibles para descarga final al aire en British Columbia - Canadá	51
Tabla 4.13: Niveles máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos - Estados Unidos	53

Tabla 4.14: Niveles máximos permisibles de calidad de aire - Estados Unidos	54
Tabla 4.15: Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgica, en mg/l - Perú	56
Tabla 4.16: Niveles máximos permisibles para emisiones gaseosas - Perú.....	56
Tabla 4.17: Emisiones máximas permisibles para emisiones de dióxido de azufre - Perú	57
Tabla 4.18: Niveles máximos permisibles de calidad de aire - Perú	57
Tabla 4.19: Estándares nacional de calidad ambiental para ruido, en dBA - Perú	58
Tabla 4.20: Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgica - Chile	59
Tabla 4.21: Frecuencia de monitoreo del agua - Chile.....	60
Tabla 4.22: Estándares nacional de calidad ambiental para material particulado respirable MP10-Chile.....	60
Tabla 4.23: Niveles que originan situaciones de emergencia ambiental para material particulado respirable MP10 y MP2.5 - Chile	61
Tabla 4.24: Niveles máximos permisibles de presión sonora corregidos, en dBA - Chile..	61
Tabla 4.25: Límites máximos permisibles para vertidos de agua provenientes de actividades industriales - Unión Europea	62
Tabla 4.26: Estándares de calidad de aire - Unión Europea	63
Tabla 4.27: Estándares de calidad para material particulado respirable PM10 y PM2.5 - Unión Europea	63
Tabla 4.28: Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes al aire de las actividades minero-metalúrgica, en mg/Nm ³ - Sudáfrica	64
Tabla 4.29: Estándar de calidad de agua dulce y marinas - Australia	65
Tabla 4.30: Estándar de calidad de aire - Australia	66
Tabla 4.31: Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes para minería de minerales de hierro y metales básicos	67
Tabla 4.32: Niveles máximos permisibles para emisión de ruido	67
Tabla 4.33: Comparativo de normas de descarga de aguas residuales de mina.....	68
Tabla 4.34: Niveles máximos permisibles de calidad de aire	70
Tabla 4.35: Niveles máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto líquidos PECT y base seca	71
Tabla 5.1: Resumen de métodos geofísicos	74
Tabla 5.2: Resumen de aplicaciones de ensayos de campo	76
Tabla 5.3: Propiedades índice y ensayos de clasificación por tipo de suelo.....	77
Tabla 5.4: Valores de propiedades índice de algunos relaves	80
Tabla 5.5: Resumen de aplicaciones de ensayos en laboratorio para medir la permeabilidad	81
Tabla 5.6: Resumen de permeabilidad de algunos relaves	82
Tabla 5.7: Valores típicos del ángulo de fricción ϕ de los residuos	82
Tabla 5.8: Resumen de ensayos de laboratorio para obtener parámetros de resistencia	83
Tabla 5.9: Valores típicos de parámetros de resistencia drenada CD, de algunos relaves	83
Tabla 5.10: Valores típicos de parámetros de resistencia no drenada CU, de algunos relaves	84
Tabla 5.11: Valores de parámetros de resistencia no consolidada no drenada UU de algunos relaves	84

Tabla 5.12: Parámetros de compresión, expansión y compresibilidad	85
Tabla 5.13: Valores típicos de coeficiente de consolidación C_v e índice de compresión C_c	86
Tabla 5.14: Factores que afectan la susceptibilidad a la licuación	92
Tabla 5.15: Métodos de reducción de gradientes y presiones de agua	105
Tabla 5.16: Análisis de estabilidad de taludes	106
Tabla 5.17: Casos de análisis para presas de tierra y enrocamiento	108
Tabla 6.1: Fallas ocurridas en depósitos de residuos mineros	110
Tabla 6.2: Modos de fallas ocurridos en depósitos de residuos mineros.	113
Tabla 6.3: Trabajos de remediación según el modo de falla en depósitos de residuos mineros.	116
Tabla 7.1: Procedimientos de operación de los depósitos mineros	119
Tabla 7.2: Control de calidad de la construcción, operación y de cierre en depósitos mineros	121
Tabla 7.3: Tipos de medidores de deformación y desplazamiento	123
Tabla 7.4: Tipos de piezómetros	124
Tabla 8.1: Estrategias para manejo de residuos	127
Tabla 8.2: Aspectos ambientales de diseño	129
Tabla 8.3: Impactos ambientales de operaciones mineras durante la etapa de estudios previos, construcción, operación y cierre	131
Tabla 9.1: Datos generales del depósito de relaves “Oasis”	136
Tabla 9.2: Componentes del depósito de relaves “Oasis”	137
Tabla 9.3: Efectos del depósito de residuos “Oasis” en el flujo de agua	139
Tabla 9.4: Resumen de sondeos realizados en el depósito de relaves “Oasis”	143
Tabla 9.5: Zonificación geotécnica del depósito de relaves “Oasis”	145
Tabla 9.6: Resumen de las características físicas de los relaves	146
Tabla 9.7: Resumen de parámetros de resistencia de los relaves, ensaye consolidado no drenado CU	146
Tabla 9.8: Resumen de permeabilidades de materiales presentes	149
Tabla 9.9: Resumen de parámetros mecánicos e hidráulicos de los materiales empleados en el análisis de estabilidad	150
Tabla 9.10: Resumen de gradientes y gastos en el depósito de relaves “Oasis”	152
Tabla 9.11: Resumen de factores de seguridad.....	154

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Vista panorámica de una antigua mina de plomo, zinc y plata en Murcia, España	6
Figura 2.1: Minería, a) cielo abierto, b) cielo abierto por frentes, c) cantera, y d) glory hole	11
Figura 2.2: Minería, a) hidráulica, b) de placeres, c) pilas de lixiviación, y d) con disoluciones	12
Figura 2.3: Minería, a) Cámaras y pilares, b) pilares, c) cámaras almacén, d) subniveles, e) gradas de retroceso vertical, y f) stull stoping	14
Figura 2.4: Minería, a) corte y relleno, b) cuadros conjugados, c) frentes largos y frentes cortos	15
Figura 2.5: Minería, a) sublevel caving, b) block caving	16
Figura 2.6: Diagrama de flujo de proceso de minerales	18
Figura 2.7: a) Molinos en etapa de operación, b) cribado estático, c) hidrociclón, d) cono Reichert, e) celda de flotación mecánica, f) separadores de tambor de baja intensidad, g) pila de lixiviación, y h) espesador continuo	20
Figura 2.8: Esquema de los componentes en una operación minera	21
Figura 2.9: Flujo esquemático de productos y residuos en una explotación minera	21
Figura 2.10: a) Mina con problemas de acidez. b) vertedero de rocas de desecho de mina, c) depósito de relaves, d) escorias, e) residuos de lixiviación en pilas, y f) residuos de placeres	23
Figura 2.11: a). Generación de polvo por trabajos con maquinaria y b) generación de polvo por la presencia de fuertes vientos	24
Figura 2.12: a) Pad o pila de lixiviación y b) fundición de Sudbury en Canadá	25
Figura 2.13: a) Relaves espesados, b) filtrado de relaves, c) relaves filtrados, y d) relaves en pasta	27
Figura 3.1: a) Tipos de formas de almacenamiento en vertederos, b) vertedero de rocas en operación	30
Figura 3.2: Tipos de vertederos de residuos definidos por la topografía, a) apilado, b) plataforma, c) valle y d) ladera	30
Figura 3.3: Formas de embalse para almacenamiento de residuos, a) dique tipo anillo, b) dique tipo valle cruzado y c) pozo existente en cierre	31
Figura 3.4: Depósito de relaves en una mina a cielo abierto en cierre	31
Figura 3.5: Esquema de la sección transversal de la disposición de relaves en aguas profundas	32
Figura 3.6: Métodos de construcción de depósitos de residuos mineros tipo relaves	37
Figura 3.7: Descarga con espigas de arenas de relave en un depósito	39
Figura 3.8: Relaves filtrados, a) vista del depósito y b) descarga de relaves	41
Figura 5.1: a) Perfiles de velocidad de onda de corte de relaves obtenidos a partir de la prueba de cross-hole, S-DMT y S-CPTU. b) Ubicación de la profundidad de saturación a partir de mediciones de V_p y V_s de un depósito de relaves de cobre en Polonia	75
Figura 5.2: a) Fotografía microscópica de muestra de arena de relaves y b) curvas típicas de distribución de tamaño de partículas de relaves	78

Figura 5.3: Estructura interna de la roca de desecho en un vertedero, a) material en estrato, b) material nuevo superficial, y c) curvas de distribución granulométrica de rocas de desecho	78
Figura 5.4: Variación de las características del residuo con respecto a la ubicación en el depósito	85
Figura 5.5: Relaves de platino, a) mediciones de viscosidad que muestran la influencia del contenido de agua, y b) variación de resistencia al corte respecto al contenido de agua	86
Figura 5.6: Ensaye triaxial consolidado no drenado en un residuo minero granular	88
Figura 5.7: Relación entre el ángulo medio del talud externo y la altura para 46 depósitos estables de relaves de oro en una zona semiárida de África	88
Figura 5.8: Relación entre a) contenido de agua de la compactación y densidad seca, y b) permeabilidad y contenido de agua de la compactación	89
Figura 5.9: Trabajos de compactación en arenas de relave con rodillo liso vibratorio	90
Figura 5.10: Comportamiento de arenas en condiciones no drenadas de un espécimen, a) dilatante y b) contractivo	91
Figura 5.11: Zonas de susceptibilidad a flujo por licuación y movilidad cíclica	91
Figura 5.12: Comportamiento de arena saturada en prueba de cortante no drenado	94
Figura 5.13: Relaciones de resistencia cíclica que causa la licuación y los valores de N_1 para arenas limosas con sismos de magnitud $M = 7.5$	95
Figura 5.14: Efectos del índice de plasticidad en la resistencia cíclica de arenas con presencia de finos	95
Figura 5.15: a) Ejemplo de envolventes curva para un enrocado a altos esfuerzos, y b) conjunto de valores de ϕ' respecto al esfuerzo confinante para determinar la resistencia al corte de enrocamientos	96
Figura 5.16: Envolventes de resistencia al corte para el núcleo de bentonita GCL e interfases entre GCL y dos suelos	98
Figura 5.17: a) Curva de gradación de los relaves, b) Curvas de la relación de resistencia cíclica (5% de deformación de doble amplitud) versus el número de ciclos en relaves (finos=25%) para edades de envejecimiento de 1, 5 y 30 años	99
Figura 5.18: Esquema de un depósito de relaves convencional en el cual se indica los factores y fenómenos involucrados en su operación	101
Figura 5.19: Esquema de un vertedero de rocas de desecho convencional en el cual se indica los factores y fenómenos involucrados en su operación	101
Figura 5.20: Proceso de recarga y descarga de agua dentro de un depósito	102
Figura 5.21: Importancia de los factores climatológicos en un depósito de residuos mineros	102
Figura 5.22: Red de flujo en un depósito homogéneo, a) sin drenaje, b) con drenaje al pie de talud, c) con drenaje tipo capa drenante (dren blanket), d) con drenaje en bandas y e) con dren inclinado	103
Figura 5.23: Efecto de la ubicación de los estanques de agua en la formación de la línea superior de corriente (LSC) en un depósito de relaves construido por el método de eje central	104
Figura 5.24: Métodos para mejorar el drenaje en taludes, a) drenes perforados y b) adición de contrafuertes con drenajes en la base	105
Figura 5.25: Posibles modos de falla en depósitos de roca de desecho	107
Figura 5.26: Variación de la línea superior de corriente respecto a los métodos de construcción en depósitos de relaves	107

Figura 6.1: a) Distribución de fallas por causa, b) distribución de fallas por altura de depósito	111
Figura 6.2: Tipo de falla y ubicación por país	112
Figura 6.3: a) Fallas registradas en el tiempo, b) distribución de fallas por región	112
Figura 6.4: Samarco en Brasil en el año 2015, a) ubicación de la zona que presentó licuación estática b) vista área de la falla del depósito, c) relaves que alcanzaron el océano atlántico, y d) Erosión sobre el dique de arranque.....	114
Figura 6.5: Mount Polley en Canadá en el año 2014, a) falla en la cimentación, b) superficie de corte en el núcleo del dique remanente	114
Figura 6.6: Rotura de diques de los depósitos de relaves en a) Aznalcóllar en España en el año 1998 y b) Kolontar en Hungría en el año 2010	115
Figura 6.7: Depósito de relaves “Los Cedros” en Tlalpujahuá, año 1937. a) antes y b) después de la falla	115
Figura 6.8: Depósito de relaves Tablachaca en Perú, a) antes de la remediación, b) después de estabilización de taludes y colocación de cobertura vegetal	117
Figura 7.1: Monitoreo de desplazamiento con equipo topográfico	123
Figura 7.2: Piezómetros, a) pozos de observación, b) tubo abierto, c) neumático, y d) cuerda vibrante.....	125
Figura 7.3: Sección de un esquema de monitoreo piezométrico en un depósito construido con el método aguas abajo.....	125
Figura 8.1: Estrategia de manejo de contaminantes y residuos	127
Figura 8.2: Flujo que ilustra el manejo para reducción de residuos mineros	128
Figura 8.3: a) Vertedero de rocas adyacente a un valle y b) recuperación de vertedero de rocas de desecho en etapa de cierre	130
Figura 8.4: Alteración de paisaje por una operación minera.	132
Figura 9.1: Vista del depósito de relaves Oasis	135
Figura 9.2: Plano topográfico del depósito de relaves “Oasis”	137
Figura 9.3: Vista satelital del depósito de relaves Oasis	138
Figura 9.4: Esquema en planta de los componentes del depósito de relaves “Oasis”.....	138
Figura 9.5: Ubicación del depósito de relaves “Oasis” en el mapa geológico regional del cuadrángulo de Recuay	140
Figura 9.6: Ubicación de sondeos geotécnicos y sección 1-1.....	143
Figura 9.7: a) Sondeo de penetración estándar, b) muestra recuperada con tubo de caña partida, dentro del depósito de relaves Oasis	143
Figura 9.8: Vista de dos pozos a cielo abierto realizadas dentro del embalse del depósito de relaves “Oasis”	144
Figura 9.9: Sección geotécnica del depósito de relaves “Oasis”, etapa de cierre temporal	145
Figura 9.10: Gráficos de ensayos compresión triaxial consolidado no drenado CU, a) deformación vs. esfuerzo desviador y b) deformación vs. presión de poro (u)	147
Figura 9.11: Trayectorias en esfuerzos, a) totales y b) efectivos, ensayos de compresión triaxial consolidado no drenado CU	148
Figura 9.12: Gradientes máximo y de salida en a) etapa de operación $N_v = 4499$ msnm, a) etapa de cierre temporal $N_v = 4,497$ msnm.	151

Figura 9.13: Perfiles de velocidad de flujo de agua respecto al eje horizontal, a) etapa de operación $N_v = 4,497$ msnm, a) etapa de cierre temporal $N_v = 4,499$ msnm.	151
Figura 9.14: Factores de seguridad en la etapa de operación $N_v = 4,499$, a) condición estática y b) condición pseudo-estática.....	152
Figura 9.15: Factores de seguridad en la etapa de cierre temporal $N_v = 4497$, a) condición estática y b) condición con sismo.	153
Figura 9.16: Factores de seguridad obtenido del análisis de sensibilidad para la condición con sismo, a) etapa de operación $N_v = 4,499$ y b) etapa de cierre temporal $N_v = 4,497$	154
Figura 9.17: a) Trabajos de corte en el talud aguas abajo, b) conformación y compactación de una capa de relleno en un terraplén del dique, c) verificación del grado de compactación y d) nivelado y perfilado en el talud aguas abajo del depósito	155
Figura 9.18: Vista del depósito de relaves "Oasis" a) Antes y b) Después de los trabajos de estabilización para cierre temporal	156

RESUMEN

La actividad minera trae consigo mejoras en el aspecto socio-económico en aquellos países dedicados a la extracción de metales y minerales de beneficio. En las actividades de explotación minera, el uso de sustancias químicas y el proceso para obtener minerales da lugar a la producción de residuos que generalmente contienen componentes altamente tóxicos para la salud y el medio ambiente. Estos problemas han sido originados desde las primeras civilizaciones, generando la producción de materiales que presentaban poco valor comercial y que eran apilados sin control alguno.

El principal objetivo de esta investigación es desarrollar un claro entendimiento de los aspectos geotécnicos, ambientales e ingenieriles, en las operaciones mineras, considerando que el desconocimiento de estos aspectos ha llevado a fallas de depósitos con consecuencias de pérdidas de vidas y graves daños ambientales. Se pone énfasis en los aspectos geotécnicos y ambientales relacionados con el comportamiento del residuo, cuando es sometido a diversas sollicitaciones y tratamientos químicos durante las diferentes etapas de la operación minera. Se hace una revisión del estado actual de los aspectos generales de las explotaciones mineras que involucran el impacto socio-económico, los tipos de explotación, procesamiento de minerales, origen y tipos de residuos mineros, así como la disposición y el diseño de los depósitos, según los manuales, guías y normativas de varias entidades y países con actividades mineras. Como parte del trabajo desarrollado se presenta en esta tesis un cuadro comparativo que permite identificar las diferencias de los parámetros límites de descarga al entorno receptor (aire, agua y suelo) que existen en algunos países con actividad minera; se espera que esta tabla ayude a complementar y controlar los niveles de contaminantes en aquellos países que carecen de normas reguladoras. Se describen algunas fallas en depósitos de residuos que han sido registradas en los últimos años en diversas partes del mundo, así como los trabajos de remediación que se aplicaron. Los aspectos de construcción, operación y de cierre se tratan mediante la descripción de los trabajos relacionados a los monitoreos geotécnicos y ambientales, así como aquellos de control de la calidad, teniendo en cuenta que cada una de estas actividades se encuentra sujetas a normativas que regulan los contenidos de contaminantes en su entorno.

Asimismo, se presenta un ejemplo de aplicación en un depósito de residuos mineros ubicado en Perú. Se analiza la estabilidad del talud considerando el flujo de agua, las fuerzas de filtración y sísmicas. Esto se hace tomando en cuenta los aspectos geotécnicos desarrollados a lo largo de la presente investigación.

Finalmente, se presentan comentarios y conclusiones de esta investigación que pretende tomar conciencia de que toda actividad humana debe preservar el medio ambiente para las futuras generaciones que habiten este planeta.

ABSTRACT

The mining activity brings about improvements in the socio-economic aspect in those countries dedicated to the extraction of metals and minerals of benefit. In mining activities, the use of chemical substances and the process to obtain minerals leads to the production of residues that generally contain highly toxic components for health and the environment. These problems have been originated since the first civilizations, generating the production of materials that presented little commercial value and that were stacked without any control in the deposits.

The main objective of this research is to develop a clear understanding of the geotechnical, environmental and engineering aspects in mining operations, considering that ignorance of these aspects has led to failure of deposits with consequences of loss of life and serious environmental damage. Emphasis is placed on the geotechnical and environmental aspects related to the behavior of the waste, when it is subjected to various chemical treatments and treatments during the different stages of the mining operation. A review is made of the current state of the general aspects of the mining operations that involve the socio-economic impact, the types of exploitation, mineral processing, origin and types of mining waste, as well as the layout and design of the deposits, according to the manuals, guides and regulations of several entities and countries with mining activities. As part of the work developed, this thesis presents a comparative table that allows to identify the differences of the discharge limits parameters to the receiving environment (air, water and soil) that exist in some countries with mining activity; it is expected that this table will help to complement and control the levels of contaminants in those countries that lack regulatory norms. Some faults are described in waste deposits that have been registered in recent years in various parts of the world, as well as the remediation works that were applied. The aspects of construction, operation and closure are treated by describing the work related to geotechnical and environmental monitoring, as well as those of quality control, taking into account that each of these activities is subject to regulations that regulate the contents of pollutants in their environment.

Also, an application example is presented in a mining waste deposit located in Peru. The stability of the slope is analyzed considering the water flow, the filtering and seismic forces. This is done taking into account the geotechnical aspects developed throughout the present investigation.

Finally, comments and conclusions are presented in this research that aims to be aware that all human activity must preserve the environment for future generations who will inhabit this planet.

1 INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

Las actividades mineras se remontan a miles de años atrás. Los vestigios de los primeros pobladores tales como utensilios o herramientas de caza demuestran los primeros usos que se le daban a ciertas rocas y metales. La necesidad de utilizar mejores materiales permitió el desarrollo de las actividades de extracción de rocas y minerales y el procesamiento de los mismos. Poco a poco se fueron desarrollando procesos físicos y químicos para mejorar la eficiencia en la obtención de minerales. Al inicio se provocaba poca alteración al suelo, agua y aire. En la minería moderna, y cada vez más en expansión y desarrollo, los impactos ambientales pueden ser severos. Un episodio importante de esto se dio en España, en el río Tinto por la muerte repentina de peces en un sitio adyacente a una pila de residuos mineros producto de las explotaciones del lugar (Lottermoser, 2010).

Los procesos desarrollados a lo largo de la operación minera llevan consigo a la obtención de residuos que son productos de la separación de los minerales de los materiales removidos de la corteza terrestre. Estos residuos pueden ser del tipo gaseoso, sólido y líquido, variando en el tamaño y su composición. La peligrosidad de estos residuos depende del proceso químico al cual fue sometido. El tipo de explotación, el proceso para la obtención de minerales de beneficio, el tipo de disposición y el método de colocación de los residuos, aunado al origen mineralógico del mineral, son los factores que determinan las características físicas, mecánicas, hidráulicas y químicas de un residuo minero en las diferentes etapas de operación.

La emisión de contaminantes al medio ambiente está regulada en diversos países con presencia minera. Estas normas o regulaciones especifican el límite máximo permisible que deberán contener las emisiones que realizan las mineras a un cuerpo receptor. Los parámetros de medición abarcan desde metales pesados, niveles de acidez, material particulado, sólidos suspendidos, entre otros elementos o compuestos que puedan afectar o alterar la flora y fauna circundante a las operaciones mineras.

Las fallas ocurridas en depósitos de residuos trajeron consigo la incógnita del comportamiento real de los materiales depositados. Identificarlos sólo como suelos no cubren las variaciones que estos materiales presentan durante la etapa de procesamiento en planta y en la disposición final, siendo importante tener en cuenta los aspectos geotécnicos de los residuos. Los trabajos de exploración y caracterización geotécnica de los residuos son de importancia al momento de llevar a cabo los diseños de los depósitos, identificar la granulometría, plasticidad, así como otras propiedades índice permitirá estimar de algún modo la respuesta del residuo a ciertas condiciones de operación y en algunos casos permitirá poder reconstituir muestras de residuo que por su característica no cohesiva no puedan ser extraídas de forma "inalterada" durante la etapa de exploración en campo. Otro aspecto a tener en cuenta es el tipo de almacenamiento y altura del depósito. Una disposición en estado suelto (comportamiento contractivo), compacto (comportamiento dilatante) o acuoso, influenciarán en la respuesta de los residuos a las cargas estáticas (colocación de terraplenes) o cargas dinámicas (eventos sísmicos, explosiones, equipos). Una elevada altura del depósito provocará que el material se consolide por disipación de la presión de agua y en algunos casos sufra ablandamiento por deformación excesiva del material granular, como se da en los vertederos de rocas de desecho que logran alcanzar grandes alturas en áreas reducidas. La adición de químicos en estado líquido a los residuos

hace que la impermeabilización con uso de coberturas de geosintéticos sean de utilidad como barrera de filtración al medio ambiente, pero a su vez provoca que la interfase entre estas coberturas geosintéticas y el residuo presenten diferentes respuestas según el material empleado. El flujo de agua dentro del depósito dependerá de la permeabilidad de los residuos, el nivel de agua en el estanque y las condiciones de drenaje dentro del depósito. Las fuerzas de filtración que se generen dentro del depósito adicionado a las fuerzas de empuje generadas por la masa de los materiales presentes en los taludes, provocan inestabilidad en el depósito; para esto se toman en cuenta los métodos de análisis de estabilidad que son de aplicación en las etapas de diseño.

Las investigaciones realizadas en aquellos depósitos que fallaron durante las etapas de operación o de cierre dieron como resultado diversos modos falla como la licuación (estática o dinámica), falla en el suelo de cimentación, excesivos niveles de agua y filtración excesiva. Los trabajos de remediación toman en cuenta el mecanismo que desencadenó la falla y permiten realizar acciones que permitan remediar las zonas afectadas. La recuperación de esta zona no sólo conlleva a trabajos de remoción de materiales, sino a trabajos de remediación ambiental cuyo objetivo es retornar al área afectada a su estado natural.

Los aspectos ambientales se hacen presentes desde el momento en que se realiza la adición de componentes químicos, teniendo en cuenta los efectos que se presentan al entrar en contacto con el medio ambiente, afectando no sólo al ser humano sino, también a la flora y fauna. Por tanto, el diseño, construcción, operación y cierre de un depósito no sólo debe abarcar el comportamiento físico y mecánico; además comprende las propiedades químicas que éstos presentan y que alteran la respuesta de los residuos a diversas sollicitaciones a las que son impuestas.

Por otra parte, los problemas ambientales asociados con el manejo de los residuos mineros están relacionados con la contaminación potencial del agua, del aire y del suelo, que son ocasionados por la inadecuada operación durante las etapas de construcción, operación y de cierre de los depósitos de residuos.

Los beneficios económicos que traen las explotaciones mineras se extienden desde el aumento en aporte de impuestos hasta la generación de empleo directo e indirecto. Este desarrollo es llevado a cabo manteniendo políticas que permitan el beneficio de la sociedad sin afectar considerablemente el medio ambiente.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de esta investigación es desarrollar un claro entendimiento de los aspectos geotécnicos y ambientales en las operaciones mineras, considerando que el desconocimiento de estos aspectos ha llevado a fallas de depósitos con consecuencias de pérdidas de vidas y graves daños ambientales.

La presente tesis tiene como objetivos específicos:

- Describir la importancia socioeconómica, tipos de explotación y descripción del origen y producción de los residuos mineros que se presentan en las explotaciones mineras.
- Describir los tipos de disposición, tipos de almacenamiento y el diseño de los depósitos de residuos mineros.
- Comparar las normas internacionales relacionadas a la emisión de contaminantes provenientes de las actividades mineras.
- Realizar una síntesis de los aspectos geotécnicos relacionados a los residuos durante la etapa de diseño.
- Describir los modos de falla que se presentan en el almacenamiento de residuos.
- Sintetizar los aspectos de construcción, operación de cierre involucrados en los depósitos de residuos.
- Resumir los aspectos ambientales relacionados a las actividades que se realizan en las operaciones mineras.
- Efectuar un ejemplo de aplicación geotécnico de un depósito de residuos mineros tomando en cuenta las consideraciones realizadas en la presente tesis.

1.3 Alcances

Los alcances de esta tesis comprenden el desarrollo de cada capítulo, así como los comentarios y conclusiones al final de los mismos.

El capítulo 2 corresponde a las explotaciones mineras, en el cual se hace una descripción breve desde sus inicios hasta el estado actual, el impacto socio-económico, los tipos de explotación y una descripción de los residuos que se generan a lo largo de la etapa de producción de una mina.

En el capítulo 3 se describe la disposición y diseño de almacenamiento de residuos mineros, los tipos de almacenamiento, disposición y el diseño de estos depósitos según el tipo de residuo a almacenar.

En el capítulo 4 se hace una revisión de las normativas ambientales de agua, aire y suelo de algunos países con actividad minera, que regulan y fiscalizan la emisión de contaminantes al medio ambiente. Se presentan tablas comparativas según el tipo de material descargado.

El capítulo 5 comprende los aspectos geotécnicos de diseño de depósitos de residuos mineros, se realizan las consideraciones previas y se mencionan los aspectos relacionados a las características físicas y mecánicas de los residuos que se emplean durante el diseño de los depósitos de almacenamiento de los mismos.

El capítulo 6 se hace un resumen de los modos de falla en depósitos de residuos mineros y remediación, se presentan algunas fallas que fueron registradas, los modos de falla y sus respectivos trabajos de remediación que ocurren durante la etapa de construcción, operación y de cierre de los depósitos de residuos mineros.

El capítulo 7 trata los aspectos técnicos de construcción, operación y de cierre de depósitos de residuos mineros, se mencionan los trabajos relacionados como monitoreo, inspección visual, empleo de medidores de presión de agua y medidores de desplazamiento, en las distintas etapas de un depósito de residuos mineros.

En el capítulo 8 se mencionan los aspectos ambientales involucrados durante el diseño, operación y cierre de los depósitos de residuos mineros.

En el capítulo 9 se efectúa un ejemplo de aplicación, en el cual se presenta los resultados de los análisis realizados de un depósito de relaves que se encuentra ubicado en Perú. Se evalúa la estabilidad considerando los aspectos geotécnicos mencionados en los anteriores capítulos.

Por último, se presenta las conclusiones y recomendaciones correspondientes, seguida de las referencias bibliográficas empleadas durante el desarrollo de la presente investigación.

2 EXPLOTACIONES MINERAS

2.1 Generalidades

La explotación minera es la etapa final de la actividad minera y se refiere a la recuperación de minerales extraídos de la tierra. Las contribuciones hechas por la minería han desempeñado un papel importante en el desarrollo de la civilización. Actualmente, los productos provenientes de la minería están presentes en la industria y en la vida diaria de las personas, pero durante el proceso de obtención de estos productos se realizan actividades desde la extracción de la tierra hasta el proceso de separación de los minerales de beneficio del material sin valor económico. Los residuos generados durante todas estas etapas toman diferentes nombres ya sea por su tamaño, composición física y química, contenido de agua o por el proceso empleado durante su producción.

Se tienen registros desde 300,000 años a.C., de la búsqueda de minerales no metálicos como la pedrería, obsidiana y esquisto, que eran adecuados para utensilios y eventualmente para armas. Otras rocas y minerales como el caolín y otras arcillas, hierro y sal y materiales de construcción (SME, 2011).

Los descubrimientos de los abundantes suministros de pedrería de alta calidad al norte de Francia y al sur de Inglaterra, son ejemplos del avance de la minería hacia 40,000 años a.C. Hay indicios de explotaciones mineras subterráneas durante el período neolítico comprendido aproximadamente entre 8,000 a.C a 2,000 a.C. En ellas, se utilizaban herramientas como martillos y piedras. Se realizaron túneles interconectados alcanzando 90.0 m de profundidad en la tiza blanda del norte de Francia y al sur de Inglaterra. Posteriormente, la tecnología pirometalúrgica de occidente tuvo su origen en la zona de la antigua Anatolia en Turquía, Siria, Egipto, Irak e Irán (SME, 2011). Así se inició la explotación masiva de cobre, plomo y plata a partir de minerales de óxidos y sulfuros. También se mejoraron las propiedades físicas de los metales al mezclarlos surgiendo la aleación.

La extracción de los recursos minerales se realizó a nivel de la superficie obteniendo minerales ricos en metales, lo cual podían lograr una concentración adecuada mediante recolección a mano o simple lavado; sin embargo, a medida que aumentaba la extracción de más recursos, los minerales ya no presentaban los grados y la mineralogía existente se hacía más compleja. A esto, Georgius Agrícola en 1556 en su libro “Re Metallica”, menciona trabajos como apilar piedras y rociarlas con agua para la recuperación del alumbre. Este procedimiento de extracción de soluciones a gran escala probablemente comenzó con la lixiviación en pilas y precipitación de cobre en Río Tinto en España por el año 1752 (Lottermoser, 2010), que a su vez acarreo la contaminación del río.

América latina

En países como Perú y México, el oro y la plata ya habían sido explotados por los incas y aztecas desde tiempos precolombinos. Con la llegada de los españoles, el oro era extraído por fundición de minerales, pero principalmente por amalgamación con mercurio.

En las Leyes de Indias en el título XIX del libro IX correspondiente al descubrimiento y labor de minas, ya se contemplaba la disposición de residuos mineros: “*Los desmontes y*

escoriales que se sacasen de los ensayes y fundiciones, lamas, laves y relaves, después de haberlos aprovechado sus dueños, con los ingenios de que usan en la forma común, se guarden y recojan, porque estén de manifiesto para el beneficio público, utilidad de sus dueños y aumento de nuestra Real Hacienda”.

Con esto se entiende que los residuos de mina eran almacenados para seguir obteniendo más beneficios, haciendo esfuerzo para recuperar y conservar el mercurio que fue introducido para aumentar el rendimiento en el proceso de separación de los minerales. Este elemento era tanpreciado como el mismo mineral a extraer. Sin saber de los daños que estos ocasionaban en la salud de los involucrados durante su aplicación y en el medio ambiente. Por tanto, se encuentra mercurio desechado alrededor de las antiguas minas y que constituyen hasta hoy un serio riesgo ambiental.



Figura 1.1: Vista panorámica de una antigua mina de plomo, zinc y plata en Murcia, España (Oyarzun, Higuera y Lilo, 2011)

En 1800, la introducción de la molienda junto con el empleo de vapor incrementó notablemente la capacidad de beneficio de los minerales. Simultáneamente en Gran Bretaña, Australia e Italia, se empleó la técnica de flotación para la separación de las partículas de mineral molido por diferencias en su gravedad específica (SME, 2011). El material sin valor comercial del beneficio de las minas se acumulaba con frecuencia, sobre los arroyos y ríos a fin de que fuera arrastrado por ellos.

Alrededor de 1900, la industria minera se caracterizó por el desarrollo de la tecnología para la explotación a gran escala. Principalmente por los métodos de la flotación mineral y técnicas hidrometalúrgicas. Esto, a su vez produjo como subproducto, una gran cantidad de residuos remanentes denominados relaves mineros en Sudamérica, jales en México, colas en Centroamérica (“tailings”, en inglés).

En 1940 la disponibilidad de equipos de movimiento de tierras de gran capacidad, hizo posible la construcción de depósitos, de manera similar a la construcción convencional de presas de almacenamiento de agua y con el correspondiente grado de seguridad. Sin embargo, su diseño y construcción era empírico, relacionado con las prácticas de construcción y equipo disponible en esa época y sin el beneficio del diseño de ingeniería geotécnica. Aun así, en 1950, muchos principios fundamentales de ingeniería de presas fueron comprendidos y aplicados a los depósitos en muchas minas de Norteamérica. Sin embargo, no fue hasta los años 1960 que la ingeniería geotécnica y las disciplinas relacionadas se adoptaron, mejorando la seguridad de los depósitos de residuos mineros.

El desarrollo en la obtención de minerales permitió que diversas ciudades en el mundo empezaran a presentar desarrollo económico. Esto atrajo a las actividades agropecuarias como complemento. Esto generó conflictos sobre el uso del agua y su disponibilidad debido a que los residuos acumulados empezaron a obstruir los canales de irrigación y contaminar las tierras de cultivo. La descarga no controlada de residuos al medio ambiente llevó a crear leyes, iniciándose en Norteamérica para extenderse a los demás países con actividades mineras. Las autoridades obligaron a los mineros a almacenar de manera segura los desechos de la mina y reutilizar el agua que se producía durante el proceso de extracción de los minerales.

2.2 Impacto socio-económico

La minería ha generado un impacto en los aspectos económicos y sociales en aquellos países con presencia de actividad minera. Aportan al producto interno bruto, a la generación de empleo y generan divisas que contribuyen a los gastos públicos. En este capítulo se presenta de manera resumida la influencia económica en 7 países representativos por su tradición minera y su producción.

2.2.1 México

El sector minero - metalúrgico en México representa un PIB cercano a 3.6% al año 2015, respecto al PIB nacional. Este valor comparado con el sector industrial alcanza el 21.2%. Estas cifras hacen que este sector sea uno de los principales motores económicos, por la generación de empleos, inversiones y el importante aporte al desarrollo del país. México se posiciona en producción de minerales en el primer lugar en la producción de plata a nivel mundial y se ubica entre los diez principales productores de minerales como plata, bismuto, fluorita, cadmio, molibdeno, plomo, zinc, sal, grafito, yeso, oro y cobre (CAMIMEX, 2017).

La minería se extiende en 24 de los 32 estados, debido al abundante potencial minero que convierte a este país en uno de los principales productores de minerales en América Latina y el cuarto a nivel mundial.

2.2.2 Perú

Perú cuenta con una riqueza en recursos naturales mineros, debido a su enorme diversidad geológica. Es uno de los cinco primeros productores de cobre, zinc, plata, hierro, oro y molibdeno.

La minería es el sector que más aporta al crecimiento económico, al representar más del 50% de las exportaciones. En el año 2015, el sector minería e hidrocarburos representó el 12.3% de la economía nacional y en el año 2016 alcanzó 13.8%. La minería es el tercer sector más importante de la economía nacional detrás de otros servicios. Por tanto, el sector minero es importante por la inversión generada, exportaciones y en la generación de empleos directos e indirectos.

2.2.3 Chile

La participación de las exportaciones mineras en relación al total de exportaciones de Chile sigue siendo la más importante de su economía, el cobre representa más del 90% de las exportaciones mineras, siendo el principal productor de este mineral a nivel mundial. También cuenta con reservas de molibdeno, oro y plata.

De igual modo, la minería es el sector económico con mayor contribución a los ingresos fiscales, con una participación cercana al 14.3% en promedio durante el periodo 2015-2016 (COCHILCO, 2016). La actividad minera cumple un rol importante en la economía del país, por la participación en el producto interno bruto (PIB), por la generación de empleo, inversión extranjera y exportaciones.

2.2.4 Canadá

Canadá es una de las naciones mineras más grandes del mundo, produciendo más de 60 metales, posicionándolo entre los cinco países en la producción mundial de 13 principales minerales y metales:

- Primero en potasio.
- Segundo en uranio, níquel y niobio.
- Tercero en los metales del grupo del cobalto, del aluminio y del platino.
- Cuarto en sal, azufre y tungsteno.
- Quinto en diamantes, grafito y oro.

En el aspecto económico la minería aportó \$ 72,000 millones de dólares que equivale al 3.6% del PIB del país en el 2017. En este año la industria minera representó el 19.4% del valor de las exportaciones de bienes canadienses. En el periodo de 2012 a 2016, el sector minero aportó un promedio de \$ 2.2 mil millones de dólares en impuestos y regalías por año, que equivalen al 60% del total. Mientras que el resto se pagaron en forma de impuestos a los gobiernos provincial y federal (NRCAN, 2018).

El sector minero genera alrededor de 426,000 empleos directos y 208,000 empleos indirectos. Las actividades relacionadas al empleo en este sector son la extractivas, las metalúrgicas y la fabricación. Canadá tiene uno de los mayores sectores relacionados a la minería a nivel mundial con más de 3,700 empresas que suministran servicios de ingeniería, geotécnicos, medioambientales, financieros y otros (NRCAN, 2018).

2.2.5 Estados Unidos

El segmento de minería metálica representó 319,797 empleos, 19.100 millones de dólares en compensación laboral y 54,500 millones de dólares del PIB. Los salarios anuales en el sector de la minería de mineral metálico promediaron \$ 88,800. La minería de metales representó el 19% del empleo minero total, el 18% de los ingresos laborales y el 25% de la contribución de la minería al PIB, en el año 2015.

La minería no metálica representó 833,196 puestos de trabajo, 47,400 millones de dólares en compensación laboral y 100,300 millones de dólares del PIB estadounidense. Los salarios anuales en el sector minero no metálico promediaron \$

61,800. La minería no metálica representó el 49% del empleo minero, el 46% de los ingresos laborales y el 45% de su contribución al PIB (NMA, 2016).

Este análisis puede considerarse conservador en la medida en que no incluye los beneficios económicos o laborales de la generación basada en el carbón y el uranio o la fabricación y otros usuarios finales de minerales metálicos y no metálicos. El Servicio Geológico de los Estados Unidos calcula que las materias primas minerales se transformaron en bienes y servicios de 2.5 billones de dólares en 2015, un monto equivalente al 14% del PIB total del país (NMA, 2016).

2.2.6 Australia

Australia produce una variedad de productos minerales, como el oro, mineral de hierro, níquel, diamante, tántalo y litio, y las proporciones más importantes de su bauxita. Su producción llega a alcanzar el orden de 850 000 onzas de oro al año. Además, de albergar importantes depósitos de mineral de hierro.

El producto interno bruto de la minería en Australia aumentó a 21,784.00 millones (29,336.00 millones de dólares australianos) en el cuarto trimestre de 2016 respecto a los 21,057.00 millones de dólares (28,358.00 millones de dólares australianos) en el tercer trimestre de 2016. Estas cifras representaron el 15% del PIB de Australia. Este sector aportó con 1.14 millones de empleos, lo que representó aproximadamente 1 de cada 10 empleos australianos (Department of Affairs and Trade, 2017).

2.2.7 Sudáfrica

Sudáfrica es famoso por la abundancia de recursos minerales que representan una proporción significativa de la producción mundial. Actualmente es el mayor productor mundial de oro, cromo, platino, manganeso y vanadio. Esta variedad y cantidad de depósitos minerales lo convierten en un país minero, abarcando todo el espectro de las cinco principales categorías de minerales: metales preciosos y minerales, minerales energéticos, metales y minerales no ferrosos, minerales ferrosos e industriales. La minería en Sudáfrica representa más del 10% de la producción mundial de oro, además, es el cuarto productor mundial de diamantes, así como platino, cromo, vanadio, manganeso, uranio, mineral de hierro, cobre y carbón. La minería en 2017 aportó un promedio de 8% al PIB del país. El sector minero es uno de los principales generadores de empleo del país con más de un millón de personas en empleos relacionados con la minería (Brand South Africa, 2018).

La actividad minera en estos países y otros dedicados a la explotación de recursos minerales representa un aporte importante a la actividad económica, tanto en participación en el producto interno bruto (PIB) como en la generación de empleo. Un adecuado aprovechamiento de estos recursos genera estabilidad económica a cada país involucrado, además de que cada país debe fomentar el desarrollo sostenible con el medio ambiente.

2.3 Tipos de explotación y procesamiento de minerales

Luego de identificar un depósito que ha sido explorado y evaluado, se procede a la selección del método de minado o extracción que garantice la obtención del mineral de beneficio. Los métodos de extracción de minerales pueden ser superficiales o subterráneos, mencionando que existen otros métodos en etapa de desarrollo o implementación.

2.3.1 Minería superficial

La minería superficial consiste en retirar la cobertura superficial para obtener acceso a los yacimientos. Factores locales como la presencia de climas extremos que se presentan en zonas frías o calurosas, en algunos casos pueden hacer más difícil las operaciones.

Entre los factores naturales y geológicos, se mencionan la topografía, la profundidad del yacimiento, las características espaciales del yacimiento y la presencia de agua. Estos definen el tipo de minado, que se dividen en extracción mecánica y extracción por medio de agua.

Extracción mecánica

Se hace uso de procesos mecánicos en un ambiente nominalmente seco para la extracción de minerales. Se tienen cuatro métodos de extracción mecánica (Tabla 2.1) que son de mayor aplicación en el sector minero.

Tabla 2.1: Métodos de minado superficial con extracción mecánica (modificado de SME, 2011).

Ítem	Método	Descripción
1	Minería a cielo abierto (open pit)	Es el proceso de excavación de cualquier depósito de mineral cerca de la superficie por medio de una excavación o corte realizado, utilizando uno o más bancos horizontales para extraer minerales mientras se vierten las sobrecargas (coberturas vegetales y roca de desecho) y residuos en un sitio de disposición especial fuera del límite final del pozo (Figura 2.1a).
2	Minería a cielo abierto por frentes (open cast o strip mining)	Aplicable para explotar depósitos cerca de la superficie que tienen una relación de desbroce relativamente baja, es en general de gran extensión y de procedimiento similar a la minería a cielo abierto (Figura 2.1b).
3	Canteras (quarry mining)	Similar a la minería a cielo abierto, este método altamente especializado y además el único destinado a producir según el tamaño y forma los materiales requeridos, como yeso, caliza; y; materiales empleados en el sector construcción. La fragmentación de los macizos rocosos se realiza mediante perforación, voladura y métodos mecánicos, seguido por operaciones de trituración y selección por tamaño (Figura 2.1c).
4	Minería a cielo abierto con transporte subterráneo (glory hole)	Utilizado cuando se tienen vetas angostas con inclinaciones o buzamientos pronunciados. Involucra inicialmente un minado a cielo abierto, seguido de trabajos de remoción de material por gravedad por medio de uno o más perforaciones que se encuentran comunicados en niveles subterráneos (Figura 2.1d).

Los métodos de minería superficial de mayor aplicación son la minería a cielo abierto y la minería a cielo abierto por frentes. El método de canteras y el método Glory Hole son métodos especializados y de uso menos frecuente. En ellos la extracción se hace por medios alternativos y se evita el uso de explosivos en su operación.

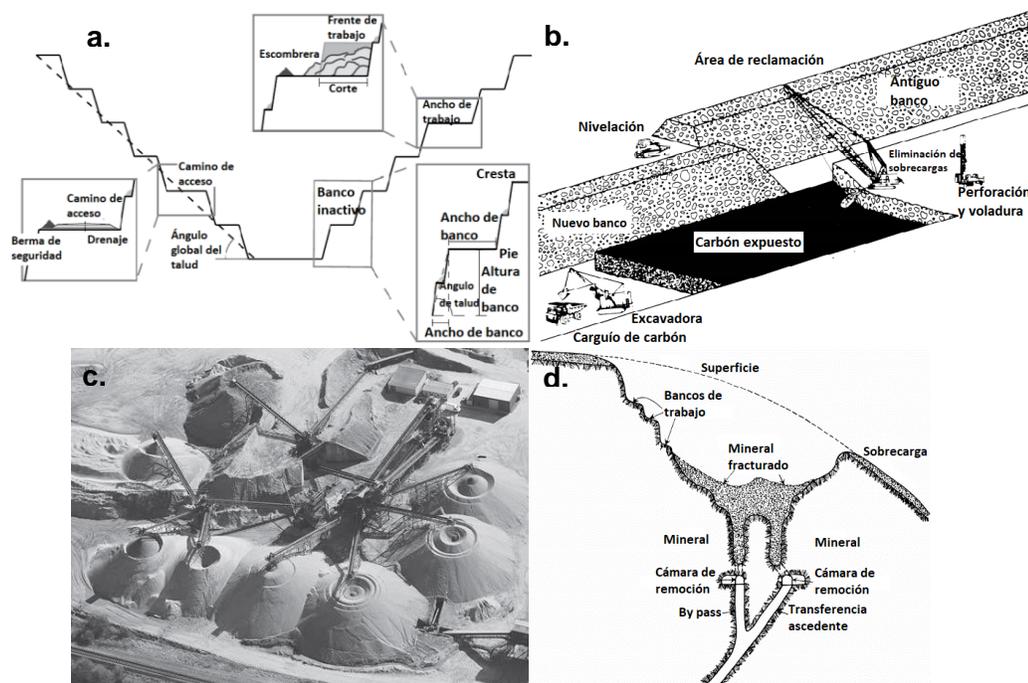


Figura 2.1: Minería, a) a cielo abierto, b) cielo abierto por frentes, c) cantera, y d) glory hole (modificado de SME, 2011).

Extracción por medio de agua

Los métodos de extracción por medio de agua (Tabla 2.2) dependen del agua o de una mezcla acuosa durante la extracción para recuperar el mineral valioso.

Tabla 2.2: Métodos de minado superficial con extracción por medio de agua (SME, 2011).

Ítem	Método	Descripción
1	Minería hidráulica	Se aplica agua a altas presiones contra un banco que se encuentra expuesto, esto ocasiona el debilitamiento y posterior derrumbe de los materiales de beneficio. Utilizada en la extracción de materiales no consolidados o depósitos aluviales (Figura 2.2a).
2	Minería de placeres	Se utiliza para explotar depósitos minerales que son poco cohesivos o no consolidados en depósitos aluviales de poca profundidad y otros depósitos que contienen minerales en estado libre. Consiste en la excavación bajo el agua de un depósito aluvial, mediante dragas (plataformas flotantes), el cual remueve el material por medio de bombas de succión a profundidad que depositan el material succionado en instalaciones de clasificación, concentración y separación de minerales. Es aplicable a la recuperación de minerales pesados como el oro, platino, diamantes, estaño y titanio, que generalmente son más pesados que el material de desecho y son separados por suspensión de base acuosa. Está limitada por la disponibilidad de agua y por el porcentaje de grava presente en el depósito (Figura 2.2b).
3	Pilas de lixiviación	Implica el apilamiento de mineral sobre una cobertura impermeable, regando el mineral durante un período prolongado de tiempo (semanas, meses o años) con una disolución química que disuelve el mineral de valor, luego se recoge el lixiviado a medida que se filtra desde la base del material acumulado. Se tienen dos tipos de lixiviación: <ul style="list-style-type: none"> • Lixiviación en pilas, involucra aplastamiento, pretratamiento y apilamiento para optimizar la recuperación del metal (Figura 2.2c). • Lixiviación de vertido, se coloca material de bajo grado en vertederos y se lixivia para obtener productos de beneficio.
4	Minería con disoluciones	Es un tipo de disolución selectiva, los minerales a extraer se disuelven dentro del cuerpo mineral, la solución es llevada por bombas a una planta de procesamiento. Los productos minerales explotados incluyen sales como cloruro de sodio, potasa, magnesio, sulfato sódico y litio, además, metales como uranio y cobre (Figura 2.2d).

Los cuatro métodos de extracción por medio acuoso se observan en la Figura 2.2.

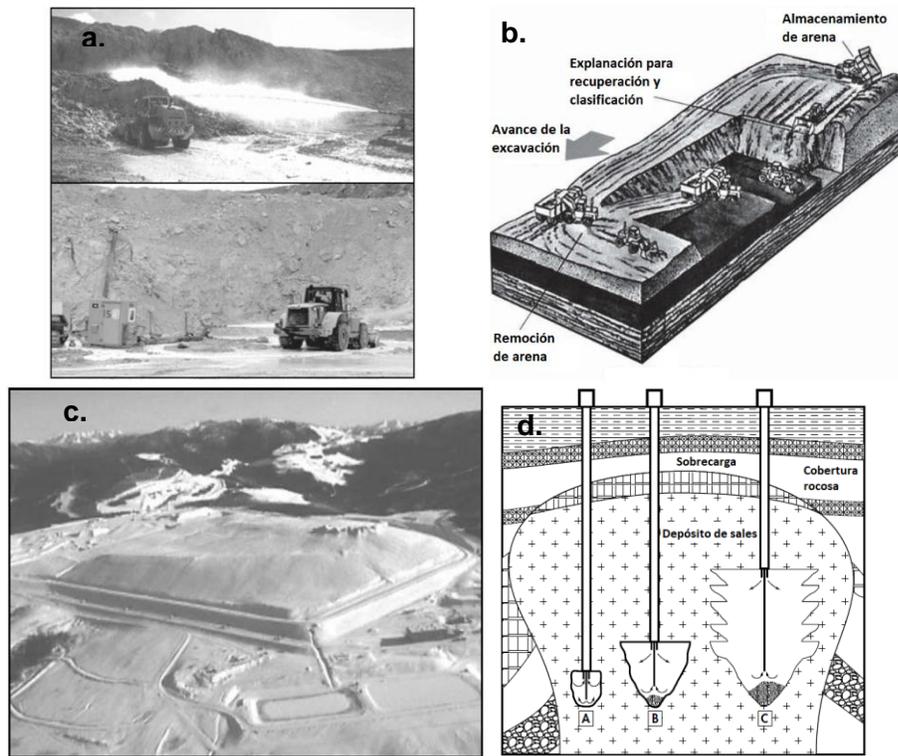


Figura 2.2: Minería, a) hidráulica, b) de placeres, c) pilas de lixiviación, y d) con disoluciones (modificado de SME, 2011).

La minería de placer es aplicable a la recuperación de minerales pesados de depósitos aluviales poco profundos y otros depósitos no consolidados; se presta a la operación a gran escala. La minería de soluciones se emplea tanto para depósitos superficiales como depósitos profundos y la lixiviación en pilas debe considerarse como una forma de molienda. En resumen, la extracción mecánica se emplea más que la extracción por medio de agua.

2.3.2 Minería subterránea

La minería subterránea se hace por medio de tiros y túneles que permiten llegar al yacimiento. Los métodos de minería subterránea se clasifican en tres clases: Sin soporte, con soporte y por hundimiento.

Minería sin soporte o auto-soportados

Los tiros y túneles o excavaciones subterráneas son auto-sostenidas y no requieren ningún sistema artificial de apoyo. Esta definición sin soporte no excluye el uso de pernos de roca o conjuntos estructurales ligeros de madera o acero, siempre que dicho soporte artificial no altere significativamente la capacidad de carga de la estructura natural. Estos métodos (Tabla 2.3) se limitan a depósitos con características favorables de auto sostenimiento.

Tabla 2.3: Métodos de minado sin soporte (modificado de SME, 2011).

Ítem	Método	Descripción
1	Minería de cámaras y pilares (room and pillar mining)	Es adaptable a depósitos planos regulares con avance horizontal; el soporte de la cubierta es proporcionado por los pilares naturales del mineral que se dejan de. Las cámaras se cortan en las entradas del acceso para proporcionar caras que contribuyen en el soporte (Figura 2.3a).
2	Minería con pilares (stope and pillar mining)	Usado en las minas donde se tienen cuerpos de mineral de gran espesor y de forma irregular. Los pilares suelen estar espaciados aleatoriamente y están conformados por residuos o minerales de bajo grado de concentración, debido a que el mineral de mayor valor se extrae en los topes (Figura 2.3b).
3	Minería shrinkage stoping	El frente de avance es hacia arriba con las capas de mineral que se fragmentan a lo largo de la longitud de la galería y que se utilizan como relleno y soporte provisional. El mineral fragmentado se acumula para proporcionar una plataforma de trabajo para las siguientes operaciones que continuaran de forma ascendente en secciones horizontales, luego se retiran los minerales a través de los conductos hacia las zonas ubicadas en los niveles inferiores, dejando alrededor del 50 a 60% del mineral fragmentado que servirá como soporte a las operaciones de avance (Figura 2.3c).
4	Minería por subniveles (sublevel stoping)	El mineral se recupera en rebajes abiertos que son normalmente rellenados después de haber sido extraído. El cuerpo mineral se divide en paradas separadas, entre los frentes se colocan secciones de mineral como pilares para soportar la pared colgante (Figura 2.3d).
5	Minería por gradas de retroceso vertical (VCR)	Procedentes del método de excavación por subniveles. Los taladros grandes, verticales y paralelos permiten la colocación de cargas explosivas de forma esférica, generando que los estratos horizontales del mineral se rompan en cortes inferiores (Figura 2.3e).
6	Minería stull stoping	Es un método a pequeña escala que emplea madera con pernos en roca, como soportes en zonas estrechas y estratificadas (Figura 2.3f).

Se presentan los seis métodos de minería sin soporte de aplicación en operaciones subterráneas (Figura 2.3).

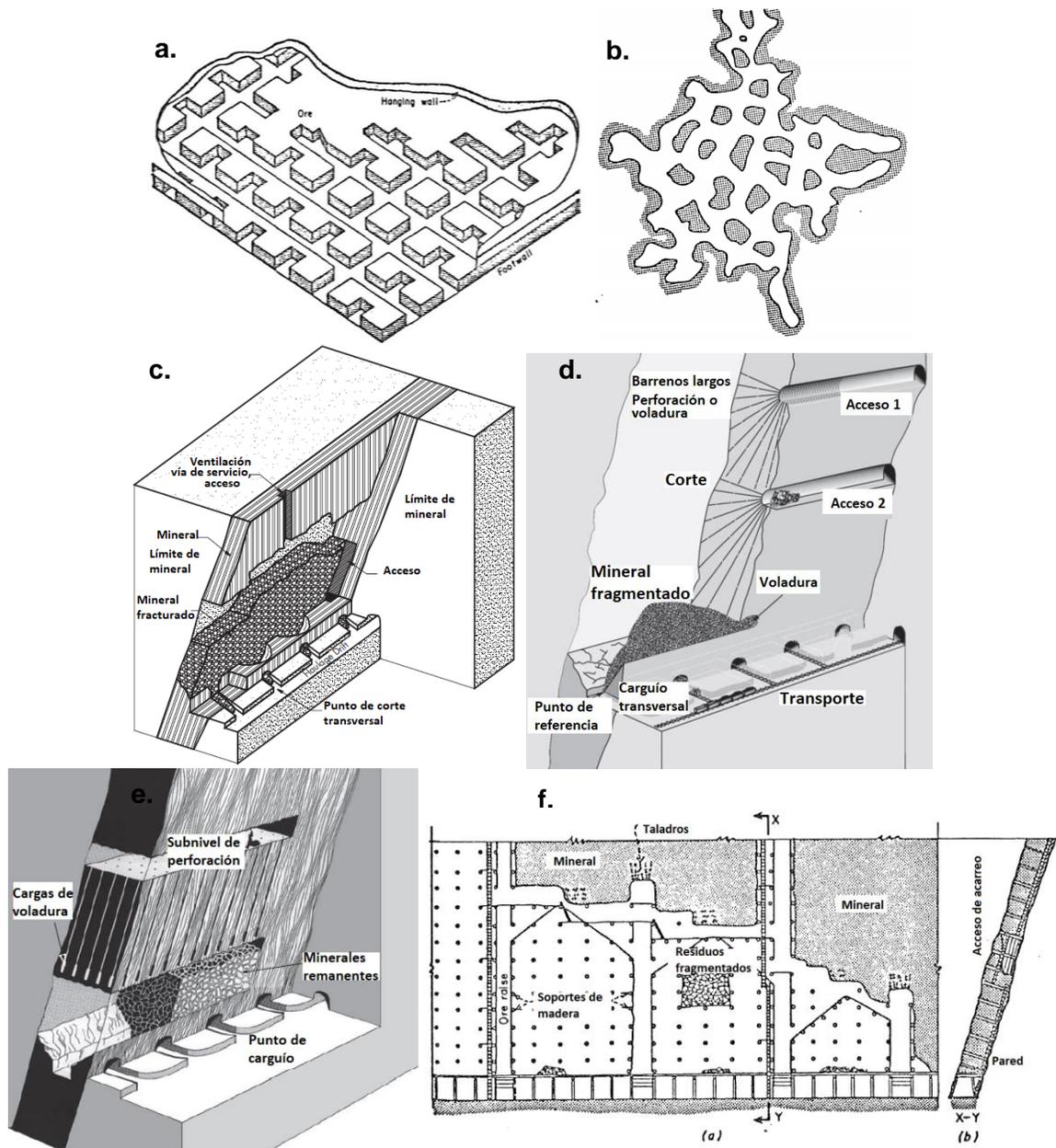


Figura 2.3: Minería, a) cámaras y pilares, b) pilares, c) cámaras almacén, d) subniveles, e) gradas de retroceso vertical, y f) stull stoping (modificado de Jackson y Gardner, 1936; SME, 2011).

Minería con soportes

Los métodos soportados se usan cuando los túneles de producción no pueden permanecer de pie durante su vida activa. O cuando la excavación o hundimiento de la superficie no garantizan la estabilidad para llevar a cabo los trabajos de explotación. Consiste en mantener la estabilidad con soportes artificiales en los tiros y túneles. Se tienen tres tipos de minería con soporte (Tabla 2.4), el método de corte y relleno, cuadros conjugados, frentes largos y frentes cortos.

Tabla 2.4: Métodos de minado con soporte (SME, 2011).

Ítem	Método	Descripción
1	Minería de corte y relleno	Se emplean normalmente para depósitos estratificados débiles. A medida que el minado progresa (normalmente hacia arriba) los materiales residuales como arenas, gravas o residuos se colocan en la plataforma para proporcionar apoyo a las paredes. El mineral obtenido es trasladado mecánicamente a ductos verticales para luego ser extraídos a la superficie (Figura 2.4a).
2	Minería de cuadros conjugados (square set stopping)	Se emplea soportes de madera, también implica el relleno, sin embargo, se basa en sistemas de madera para apoyar las paredes durante los trabajos de explotación, estos se ensamblan en una estructura de soporte continua para formar prismas reticulares que se rellenan posteriormente con material de desecho para facilitar el soporte a largo plazo (Figura 2.4b).
3	Minería de frentes largos (longwall mining)	Se aplica tanto a rocas duras como a rocas blandas, el área de trabajo a lo largo de la superficie puede ser apoyada artificialmente para que el soporte colgante colapsara (Figura 2.4c). Se utiliza en depósitos horizontales, estratificados, presentándose algunas aplicaciones en depósitos masivos inclinados o verticales.
4	Minería de frentes cortos (shortwall mining)	Se utiliza en el mismo tipo de depósito que la minería de frente largo, siendo la diferencia principal la longitud del frente de trabajo, que alcanza longitudes máximas de 45 a 50 m. Los procedimientos de trabajo son los mismos que en la minería de frente largo (Figura 2.4c).

Los cuatro métodos de minería con soporte de mayor aplicación en la actividad minera son mostrados en la Figura 2.4.

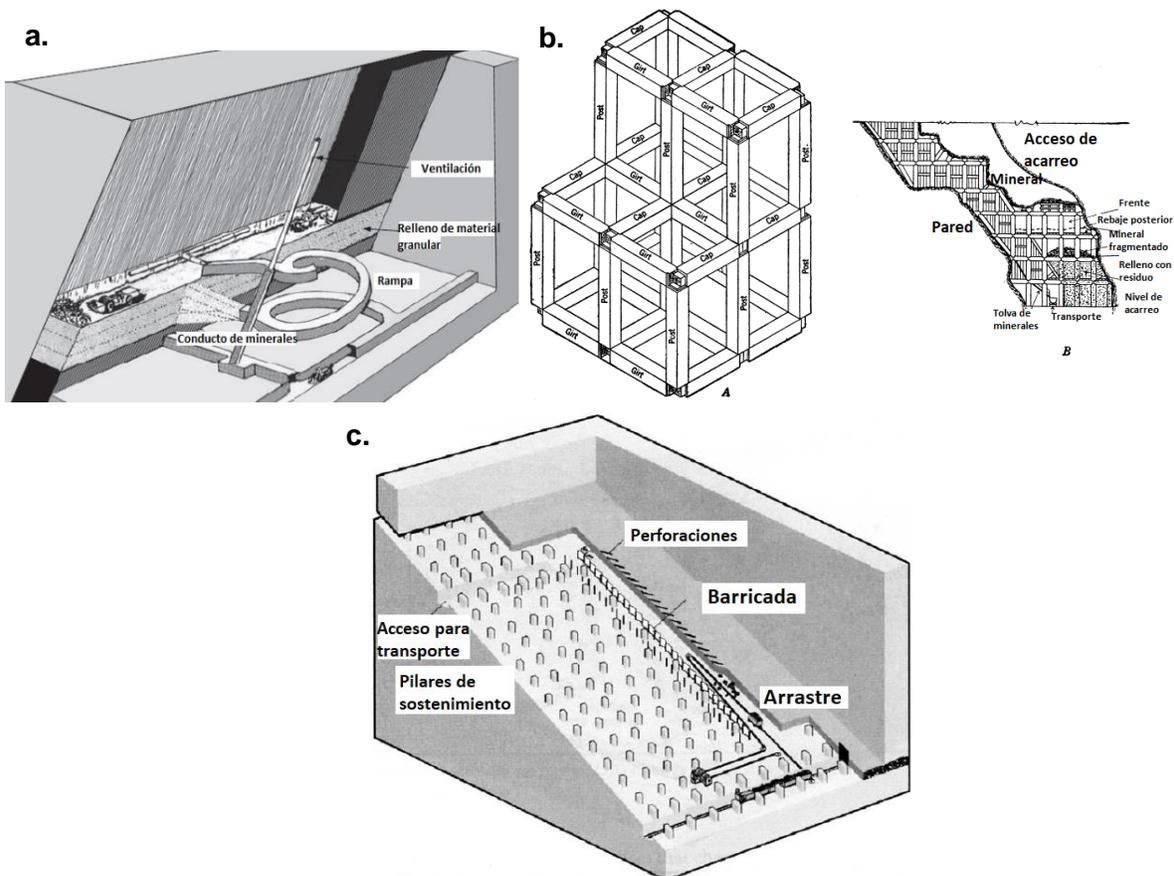


Figura 2.4: Minería, a) corte y relleno, b) cuadros conjugados, c) frentes largos y frentes cortos (modificado de SME, 2011).

Minería por hundimiento

Se define como aquellos trabajos asociados con la excavación masiva y controlada del cuerpo mineral con posterior subsidencia en la superficie. La aplicación se da en depósitos minerales masivos de gran extensión horizontal con separaciones verticales espaciadas regularmente, el peso superior fracturará las paredes de soporte para luego colapsar. Existen dos principales métodos (Tabla 2.5):

Tabla 2.5: Métodos de minado por hundimiento (SME, 2011)

Ítem	Método	Descripción
1	Minería de hundimiento por subniveles (sublevel caving)	El mineral se extrae a través de subniveles desarrollados a intervalos regulares, en el cual cada subnivel presenta una disposición sistemática con desviaciones paralelas a lo largo del cuerpo mineral. En un cuerpo de mineral de gran tamaño, las derivas de subnivel empiezan desde la deriva de la pared y se conducen hasta que llegan a la pared colgante. En cuerpos de mineral de menor anchura, se utiliza la excavación longitudinal de subnivel (Figura 2.5a).
2	Hundimiento en bloque (block caving)	Esta técnica en la que la gravedad cumple un papel importante, se utiliza en conjunción con tensiones de roca internas para fracturar y romper la masa de roca en fragmentos más pequeños debido a la presión continua. Los fragmentos de roca pasan a través de puntos de extracción donde el mineral es transportado a superficie para su posterior tratamiento (Figura 2.5b).

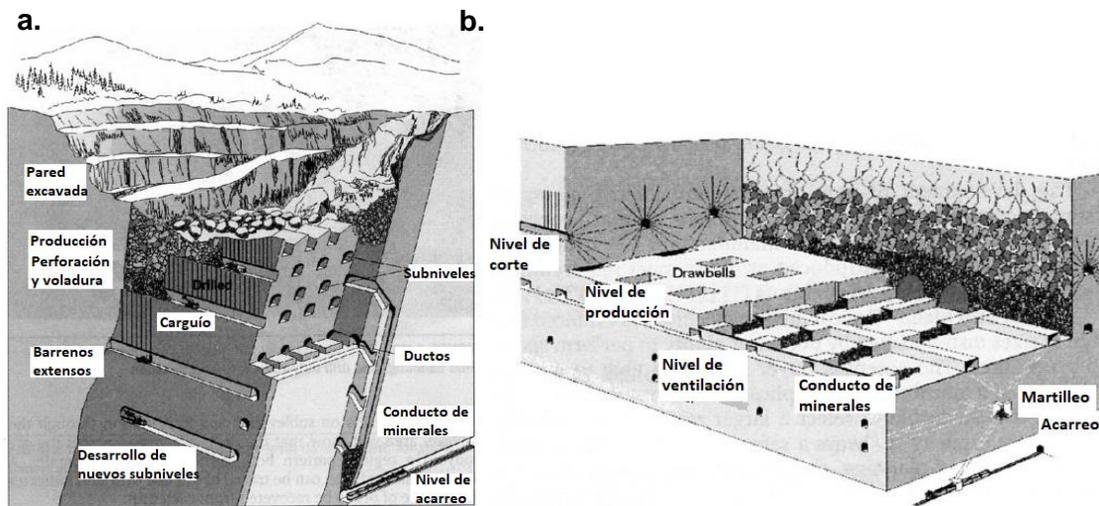


Figura 2.5: Minería, a) sublevel caving, b) block caving (modificado de SME, 2011).

Las dos clases de métodos subterráneos descritos se centran en la continuación de las operaciones de explotación abierta. Si el mineral y la roca son suficientemente competentes los métodos sin soporte son adecuados, si el mineral y la roca son incompetentes a moderadamente competentes, se requiere métodos con soporte.

2.3.3 Minería en estado de desarrollo

Existen varios métodos de extracción que no están incluidos entre los tradicionales métodos de superficie y métodos subterráneos. A estos métodos se le conocen como minería en estado o vías de desarrollo (Tabla 2.6), porque emplean principios o tecnologías innovadoras o que explotan recursos poco comunes que aún no son ampliamente aceptados en la práctica de extracción de minerales. Así como los

métodos clásicos evolucionan, se modifican, se combinan con otros métodos o se vuelven obsoletos y caen en desuso, estos pueden con el tiempo recibir la aceptación que justifica su reclasificación en una de las categorías tradicionales.

Tabla 2.6: Tipos de minería en estado de desarrollo (modificado de SME, 2011).

Tipo		Descripción
Recientes	Excavación rápida	Este método consiste en operaciones de rotura de rocas y manejo de materiales de alta resistencia con un sistema de extracción continua, con ciclos mejorados y sistematizados
	Automatización y robótica	Este método es especialmente atractivo por razones de seguridad, la adopción generalizada depende de una mayor robustez tecnológica, especialmente para el régimen subterráneo que a su vez debe producir viabilidad económica.
	Minería hidráulica	Aplicaciones de chorro de agua y tecnología de lodos y pozos de perforación en materiales más resistentes están avanzando (penetración, fragmentación y manejo) hacia un claro objetivo de un sistema minero integrado.
	Drenaje de metano	Los signos son favorables para una rápida expansión de la desgasificación de la hulla en toda la industria de la minería subterránea, en parte por razones de seguridad.
Métodos en estado de desarrollo	Gasificación subterránea	Prometedora para condiciones naturales difíciles, la gasificación en campo del carbón y la combustión han presentado riesgos económicos y dificultades tecnológicas. Implica la combustión parcial del carbón en campo, generalmente a través de perforaciones con la recolección de un gas de baja calidad en la superficie.
	Minería marina	El interés por los diversos recursos marinos es alto, esto hace que exista interés en desarrollar tecnología para la minería en depósitos que se encuentran en las profundidades de los océanos. Sin embargo, para los depósitos situados en aguas internacionales existen riesgos políticos y jurídicos hasta que se negocien tratados para los mares.
Propuestas de nuevos métodos	Explotación minera nuclear	No es probable que se produzcan aplicaciones mientras los riesgos de radiación estén presentes, además existe un tratado de prohibición que limita los ensayos nucleares.
	Minería espacial	Lo más alejado de todos los métodos en desarrollo, la colonización del espacio exterior donde el lugar de minado más probable es la luna se tiene la necesidad de justificar la explotación de minerales por los riesgos que estos presenten.

En importancia, la minería superficial se sitúa claramente por encima de la minería subterránea, si se compara el tonelaje o el valor de la producción. A pesar de contar con ventajas referentes a la producción de recursos, esta presenta algunas limitaciones como la profundidad de explotación e impactos negativos sobre el medio ambiente. Otros métodos que se encuentran todavía en conceptos, seguramente surgirán para complementar los métodos actualmente reconocidos.

2.3.4 Procesamiento de minerales

En la obtención de minerales se realizan actividades (Tabla 2.7) que consisten en la reducción de tamaño, para luego ser tratados y obtener el elemento de beneficio. En esta actividad se producen residuos líquidos y sólidos, siendo estos últimos de menor tamaño que los obtenidos en las actividades de extracción.

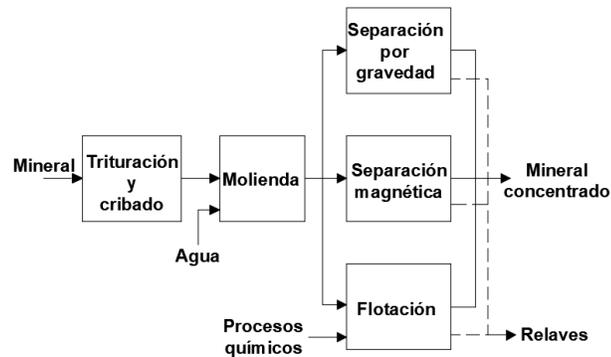


Figura 2.6: Diagrama de flujo de proceso de minerales (modificado de Lottermoser, 2010).

En estos procesos presentados en la Figura 2.6 se generan residuos líquidos y sólidos que serán descritos en el inciso 2.4.

Tabla 2.7: Procesos en la obtención de minerales de beneficio (European Comission, 2004).

Tipo	Descripción
Trituración	Se reduce gradualmente el tamaño del mineral en trituradoras hasta alcanzar tamaños de 1" (2.54cm).
Molienda	El mineral se reduce en molinos de bolas o barras hasta tamaños de partículas de polvo. Se realiza en un ambiente seco o húmedo. Como consecuencia de que la velocidad de reacción es función de la superficie de las partículas y es tanto más grande cuanto mayor es su grado de subdivisión. Luego, el material se presenta en forma de lodo, que contiene partículas de mineral de beneficio y residuos denominado relaves (Figura 2.7a).
Cribado	Es un proceso mecánico que realiza una separación de las partículas por tamaño y su aceptación o rechazo por una superficie de tamizado que presenta aberturas según el tamaño de partículas requerido (Figura 2.7b). Se realiza para producir material de tamaño controlado de partículas luego de extraerlos del minado, evitar que el material de menor tamaño se inserte a las trituradoras y evitar que el material de mayor tamaño pase a las siguientes etapas de molienda o de trituración fina.
Clasificación	Es la separación de partículas sólidas en dos o más productos de acuerdo con sus velocidades, depende de su tamaño, densidad y forma, se da en minerales que se consideran demasiado finos para ser separados por cribado. Se da principalmente en estado húmedo, siendo el agua el medio fluido, y en seco, utilizando el aire como medio. <ul style="list-style-type: none"> • Conos de sedimentación, se usan para deshinchar y los clasificadores hidráulicos se utilizan para recibir productos finales o para preparar la alimentación en varios tamaños de partícula para procesos subsiguientes de concentración por gravedad. • Hidrociclones, separan los sólidos suspendidos de un determinado flujo de la pulpa de alimentación en dos fracciones, descarga (underflow) que lleva en suspensión los sólidos más gruesos y rebose (overflow) que lleva los sólidos más finos (Figura 2.7c).
Concentración por gravedad	Es un método que separa minerales de diferente densidad por la fuerza de la gravedad o por otras fuerzas, tales como la fuerza centrífuga o la resistencia al movimiento ofrecida por un fluido viscoso como el agua o el aire. El movimiento de una partícula en un fluido depende de su gravedad específica, de su tamaño y forma. <ul style="list-style-type: none"> • Separador de medios densos es la separación física de partículas por su densidad. • Jigger o tamiz de fondo, se separan el mineral con movimientos hacia arriba y abajo en agua. Se emplea en la preconcentración o en la clasificación de un material grueso. • Mesa vibratoria, los minerales se mueven lentamente a lo largo de la plataforma, bajo dos fuerzas, la primera, causada por el movimiento de la cubierta y la segunda, por una corriente de agua, resultando la separación de los minerales, mientras que los granos ligeros y grandes son llevados a la zona de relaves, y, los pequeños y densos se transportan a la zona de concentrado de minerales. • Los espirales, los granos se estratifican por mecanismos, como, las velocidades de sedimentación diferencial de partículas, fuerzas centrífugas y trituración intersticial. • Cono invertido, los minerales se colocan por encima del cono de concentración para distribuir la suspensión de alimentación uniforme (Figura 2.7d).

Continuación de Tabla 2.7: Procesos en la obtención de minerales de beneficio (European Comission, 2004).

Tipo	Descripción
Flotación	La separación de minerales se logra utilizando las diferencias en sus propiedades físico-químicas. En el proceso de separación selectiva, las burbujas de aire se adhieren a las partículas hidrófobas, elevándolas a la superficie del agua y formando una espuma estable que luego son retiradas. Estos procesos consisten de etapas para limpiar de los concentrados y captar minerales valiosos restantes de los relaves (Figura 2.7e).
Separación magnética y electrostática	Inicialmente sólo se disponía de imanes permanentes de baja intensidad de campo y electrificación de contacto. Las aplicaciones incluyen la eliminación del hierro del mineral o el material triturado grueso (magnético) y la eliminación del polvo y de los gases de salida de la fundición (electrostáticos). (Figura 2.7f).
Lixiviación	Los minerales valiosos se disuelven de un material mediante una solución lixiviante normalmente acuosa que resulta en una solución rica con alta concentración de compuestos valiosos, el mineral de beneficio se recupera mediante esparcido de agentes líquidos que capturan y transportan el mineral hacia puntos de recolección para su posterior tratamiento (Figura 2.7g).
Deshidratación	Los minerales de metales básicos antes de ser secados son a menudo triturados a polvo fino usando procesos secos. Estos procesos generalmente usan agua porque permite una mayor eficiencia, recuperación y un menor costo por unidad de producto, además, reduce la contaminación del aire. Los equipos comúnmente utilizados para la separación líquido-sólido pueden clasificarse en las siguientes operaciones unitarias: hidrociclones, espesadores, filtros, centrífugas y depósitos de relaves (Figura 2.7h).

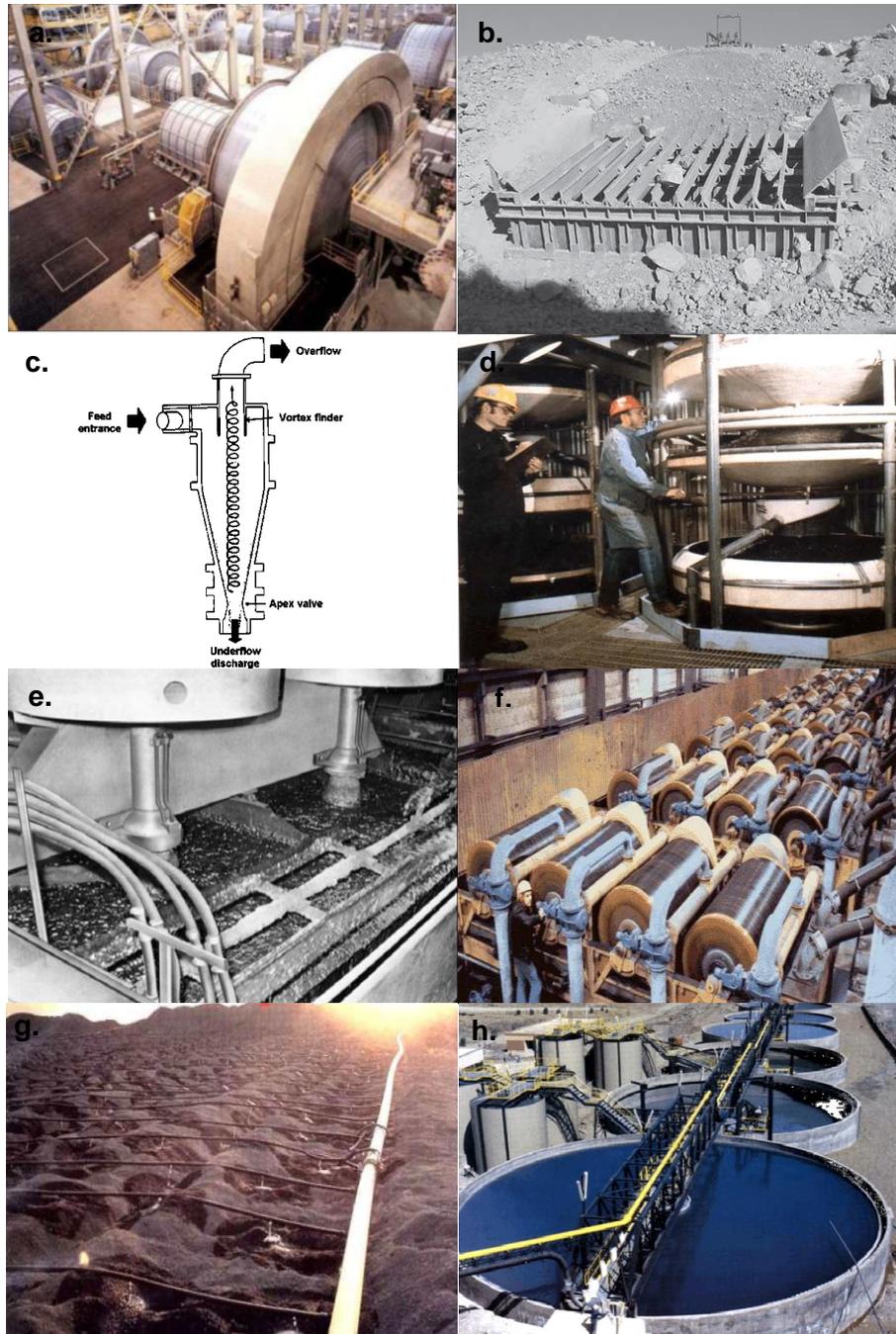


Figura 2.7: a) Molinos en etapa de operación, b) cribado estático, c) hidrociclón, d) cono Reichert, e) celda de flotación mecánica, f) separadores de tambor de baja intensidad, g) pila de lixiviación, y h) espesador continuo (SME, European Comission, 2004).

Las características del mineral en combinación con el equipo utilizado para la trituración, cribado, clasificación y concentración por gravedad, determinan las propiedades físicas de los residuos, como la distribución granulométrica de partículas. Los procesos subsiguientes que implican la adición de agua o reactivos, otorgan al residuo diferentes propiedades de consistencia y de resistencia, que son de importancia en el diseño de los depósitos.

2.4 Residuos mineros

2.4.1 Origen, producción y tipos de residuos mineros

Son el resultado de diversas operaciones y no requieren mayor uso por presentar baja concentración resultando económicamente desfavorable su procesamiento. Estos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos y son descargados o liberados de forma directa o indirecta en un cuerpo receptor o ser reutilizados.

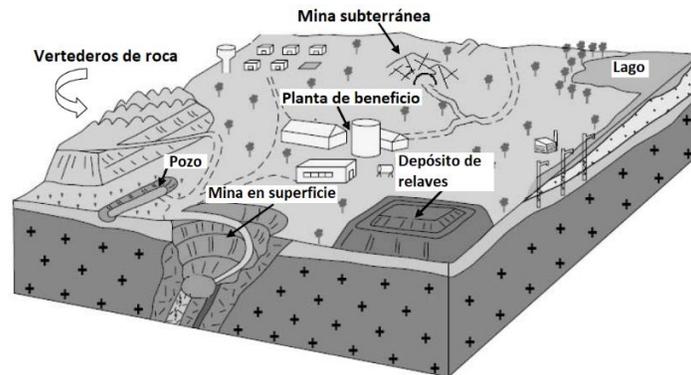


Figura 2.8: Esquema de los componentes en una operación minera (modificado de Yilmaz, 2011).

Los residuos mineros provienen de los trabajos de extracción, tratamiento y procesamiento para la obtención de concentrados de minerales de beneficio, además, de procesos metalúrgicos como la fundición (Figura 2.8).

Los residuos mineros sólidos son materiales geológicos heterogéneos que pueden consistir en rocas sedimentarias, metamórficas o ígneas, suelos y sedimentos sueltos. Como consecuencia, los tamaños de partícula varían desde partículas de tamaño de arcilla hasta fragmentos de tamaño de roca. El criterio para la separación de roca de los minerales de beneficio es el denominado grado de corte, que se basa en la concentración del elemento mineral y del costo en cada unidad de roca minada, como resultado, cada operación cuenta con procedimientos diferentes para separar los residuos del mineral (Figura 2.9).

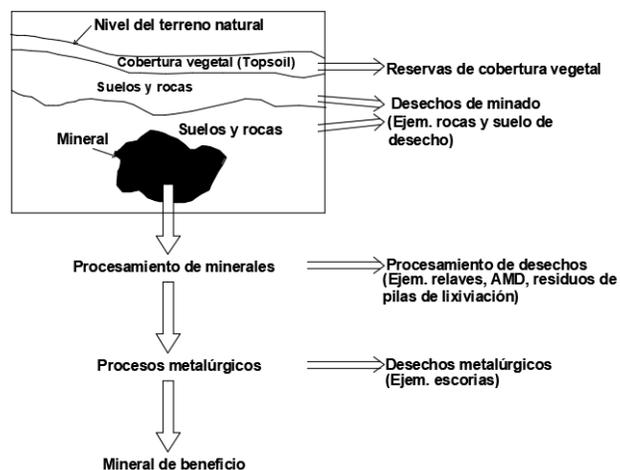


Figura 2.9: Flujo esquemático de productos y residuos en una explotación minera (modificado de Lottermoser, 2010).

Los residuos generados durante la actividad minera (Tabla 2.8) se presentan en estado líquido y sólido, variando según el tipo de extracción y tratamiento para obtener el mineral de beneficio.

Tabla 2.8: Tipos de residuos mineros producidos en una explotación minera.

Categoría	Descripción
Drenaje ácido de mina (AMD) o drenaje ácido de rocas (ARD)	Formado por la oxidación natural de minerales sulfurados cuando se exponen al agua y al aire. Puede disminuir severamente, dando como resultado la disolución y transporte de metales tóxicos disueltos tales como arsénico, plomo, cadmio, entre otros. Además, de un drástico incremento del contenido de sulfatos, llegando a los cuerpos de agua receptores como lagos, arroyos o acuíferos. Ocasionalmente turidez, sedimentación y alteran las temperaturas o la composición química, trayendo efectos nocivos en plantas y animales (Figura 2.10a). El volumen de agua producido es mucho mayor que el de residuos sólidos. En operaciones modernas el agua se recoge y es descargada en estanques de sedimentación y en depósitos de residuos tipo relaves.
Roca de desecho de mina (tepetate de mina)	Se extraen para tener acceso al mineral, consisten en rocas no mineralizadas y rocas que contienen mineralización de grado demasiado bajo para extraerlas económicamente con las tecnologías existentes. En minería subterránea, el tamaño del residuo es menor que 20 cm y las cantidades llevadas a la superficie son comparativamente pequeñas, sin embargo, el residuo proveniente de la explotación a cielo abierto es de mayor tamaño, llegando a alcanzar dimensiones de 1 m de diámetro. Las cantidades de roca de desecho a menudo llegan a ser de 2 hasta 4 veces que los relaves (Figura 2.10b).
Residuos metalúrgicos (escorias)	Se definen a los residuos obtenidos de los procesos de lixiviado o fundido que se consideran sin valor. Estos residuos pueden ser la escoria, la ceniza y el polvo producto de la combustión. Las escorias son el resultado del enfriamiento de residuos derivados de la fundición de concentrados de metales básicos. Estos pueden contener metales como arsénico, cadmio y plomo en concentraciones potencialmente tóxicas (Figura 2.10d).
Relaves (colas, jales, tailings)	Se conoce como el residuo formado por sólidos y líquidos, producto remanente después de que los minerales se han extraído del mineral mediante técnicas físicas y químicas. Los sólidos pueden subdividirse en su tamaño de partícula, generalmente en el rango de arena fina y limo. Los tres componentes, es decir arenas, lodos y líquidos, presentan propiedades químicas, mineralógicas y radioquímicas distintas (Figura 2.10c).
Residuos de pilas de lixiviación	Se derivan de un tipo de explotación que consiste en que el mineral, triturado o no, se le añade soluciones de cianuro o ácido sulfúrico, según el tipo de metal a extraer, por medio de una irrigación superficial o por infiltración (Figura 2.10e).
Residuos de placeres o lavaderos	Estos residuos son producidos por operaciones de dragados, de dimensiones usualmente del tamaño de grava gruesa o mayor, y, está desprovisto de nutrientes o material capaz de formar suelos (Figura 2.10f).
Residuos de procesos de cianuración	Son producidos por el retratamiento de residuos ricos en oro y plata, mediante el uso de cianuro como agente disolvente. Apropia para minerales que contienen poca concentración. El tamaño varía de 1 a 2 cm y se descargan en estado semiseco.
Residuos radioactivos	En los procesos de lixiviación, la mayoría de los minerales de uranio se disuelven y los minerales presentes son tratados con soluciones, creando residuos con altas concentraciones de sales disueltas y solubles, metales y radio nucleídos.

De la descripción realizada de residuos en la Tabla 2.8, se tiene que estos dependen de la mineralogía, tipo de extracción y de los procesos de obtención en planta. En la figura 2.10 se observan algunos de los residuos descritos anteriormente.



Figura 2.10: a) Mina con problemas de acidez. b) vertedero de rocas de desecho de mina, c) depósito de relaves, d) escorias, e) residuos de lixiviación en pilas, y f) residuos de placeres (Lottermoser, 2010, Oyarzun, Higuera y Lillo, 2011, MINAM PERU, 2011, STEINERT, 2017).

En la Tabla 2.9 se mencionan aquellas actividades que generan residuos según el tipo de explotación y el proceso metalúrgico empleado durante la obtención de los minerales.

Tabla 2.9: Producción de residuos por tipo de explotación minera y proceso metalúrgico.

Tipo	Actividad
Minería superficial	<ul style="list-style-type: none"> • Retiro de vegetación, suelo superficial y material de cubierta. • Voladuras, retiro de material de desbroce, roca de desecho o mineral. • Generación de polvo por tráfico y erosión, transporte y apilamiento de material de desbroce, roca de desecho o mineral, extracción, transporte y descarga de mineral. • Trituración y molienda de mineral, beneficio del mineral. • Operaciones de talleres y plantas de energía. • Erosión eólica del pozo abierto, pilas, áreas de canteras y áreas expuestas.
Minería subterránea	<ul style="list-style-type: none"> • Carga y transporte de material dentro de las excavaciones. • Movimientos de tierra asociados con el desarrollo de las actividades en la superficie como accesos a las perforaciones verticales y rampas, desarrollo de la ventilación. • Extracción, transporte, descarga; trituración, molienda y beneficio del mineral. • Operaciones de talleres y plantas de energía por combustión. • Erosión eólica de pilas de materiales, botaderos, depósitos de relaves y otras áreas.
Proceso de flotación y metalúrgicos	<ul style="list-style-type: none"> • Movimiento de materiales, almacenamiento en pilas. • Molienda, hornos de tostación y refineras pequeñas. • Circuitos de lixiviación y disposición de residuos. • En fundiciones las emisiones de hornos/fundiciones y refineras de metales son principalmente de material particulado compuesto principalmente óxidos y sulfuros, elementos como mercurio, sulfatos metálicos y ácido sulfúrico.

Las emisiones de polvo o material particulado (Figura 2.11a) se producen por la acción generada entre el rozamiento de las llantas o elementos propios de los vehículos debido a las superficies no pavimentadas, trabajos de movimiento de tierra como el carguío y transporte durante la etapa de extracción de minerales, y por la erosión eólica generada en zonas de fuertes vientos (Figura 2.11b). En países como Chile la mayoría de minas muestran que en promedio el 65% del polvo proviene de los caminos y el 35% de fuentes fijas como trituradoras, pilas de acopio, voladuras, entre otras actividades. De esta manera, en las rampas de producción y pistas de acarreo que son los principales focos de generación de material particulado, son regados constantemente con agua para mantener húmeda la superficie y evitar que el polvo se levante.



Figura 2.11: a). Generación de polvo por trabajos con maquinaria y b) generación de polvo por la presencia de fuertes vientos (Oyarzun, Higuera y Lillo, 2010)

El movimiento y traslado de material emplean vehículos y maquinarias como excavadoras, tractores, camiones, entre otros (Figura 2.11a). Estas unidades producen emisiones de material particulado como CO (monóxido de carbono), NO_x (óxidos de nitrógeno), SO₂ (dióxido de azufre) y VOCs (compuestos orgánicos volátiles), debido al proceso de combustión de combustible, siendo el de mayor uso el petróleo.

Los residuos también se generan por el tipo de tratamiento a los que son sometidos para la obtención de los minerales de beneficio (Tabla 2.10).

Tabla 2.10: Producción de residuos por tipo de tratamiento

Tipo	Actividad
Plantas concentradoras o plantas de beneficio	El material extraído de las operaciones mineras es procesado para obtener minerales concentrados y residuos que son generados por los procesos físicos y químicos que se realizan en las plantas de beneficio.
Trabajos de lixiviación	El residuo está constituido por material que fue sometido a trituración, para luego ser irrigado con líquidos que actúan como agentes lixiviantes en la obtención de los concentrados de los minerales. Estos agentes pueden variar según el elemento de interés a extraer, por ejemplo, ácido sulfúrico para extracción de cobre o cianuro para extracción de plata y oro. Presenta emisión de contaminantes al aire ocasionado por los fuertes vientos y que generan levantamiento de grandes cantidades de polvo por la alteración producida en el material granular expuesto al aire (Figura 2.12a).
Procesos metalúrgicos	Se generan residuos constituidos por escorias vítreas, generalmente compuestas por silicato que son depositados en escombreras, "polvos de humo" (material particulado con alto contenido en metales pesados, resultante de la depuración de las emisiones atmosféricas) y lodos o barros de similar composición (Figura 2.12b).

La obtención de minerales implica la adición de componentes químicos que en ciertas concentraciones puede afectar y alterar las condiciones naturales de los seres vivos.

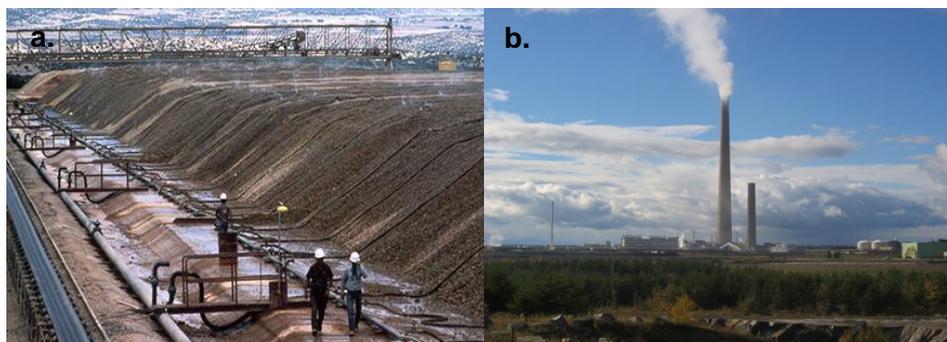


Figura 2.12: a) Pad o pila de lixiviación y b) fundición de Sudbury en Canadá (Oyarzun, Higuera y Lillo, 2010).

En el procesamiento de minerales, el ajuste del pH durante la flotación puede tener efectos significativos sobre los constituyentes inorgánicos del efluente y su efecto es acentuado si se utiliza una mezcla líquida tipo alcalina o ácida (Tabla 2.11) (Vick, 1990).

Tabla 2.11: Categorías de efluentes líquidos según el nivel de pH (Vick. 1990).

Categoría	Descripción
Neutral	Esta condición es producida por operaciones de simple lavado o separación por gravedad, donde el pH no es sustancialmente alterado. Los constituyentes químicos en el efluente serán primariamente limitados a aquellos en la roca madre que son solubles en un pH neutral. Los niveles de sulfatos, cloros, sodio y calcio pueden ser algo elevados para efluentes de esta clase.
Alcalina	Incrementando el pH del efluente puede traer como resultado en concentraciones elevadas de constituyentes tales como sulfatos, cloruros, sodio y calcio entre otros.
Ácida	Disminuyendo el pH se elevan los niveles de equilibrio de muchos contaminantes metálicos, y los efluentes ácidos pueden mostrar niveles altos de constituyentes catiónicos como hierro, manganeso, cadmio, selenio, cobre, plomo, zinc y mercurio, si está presente en la roca madre. Los efluentes ácidos también exhiben concentraciones elevadas de aniones como sulfatos y/o cloruros. Efluentes de bajo pH ocasionan los mayores problemas de desechos líquidos.

Existen cuatro categorías (Tabla 2.12) para clasificar los residuos tipo relaves según las características físicas como granulometría y plasticidad.

Tabla 2.12: Características físicas de relaves (Vick, 1990).

Categoría	Características
Relave de roca blanda: • Desecho de carbón fino y potasa.	Contiene fracciones de arena y lama. Las lamas pueden dominar todas las propiedades por la presencia de arcilla.
Relave de roca dura: • Plomo, cobre, oro, plata, molibdeno, níquel.	Pueden contener fracciones de arena y lama, esta última usualmente de baja plasticidad. Las arenas por lo general controlan las propiedades para propósitos de ingeniería.
Relaves finos: • Arcillas fosfáticas. • Limos rojos de bauxita. • Taconita fina (roca férrica). • Lamas de arena.	La fracción de arena es pequeña o nula. La respuesta del material, particularmente las características de sedimentación-consolidación son dominadas por las partículas de tamaño de limo o arcilla y pueden dar problemas de volumen de disposición.
Relaves gruesos: • Arenas alquitranosas. • Relaves de uranio. • Relaves de taconita. • Arenas fosfatadas.	Contienen principalmente partículas de arenas o tamaños de limos no plásticos, exhibiendo comportamiento como la arena y generalmente presentan características favorables para fines ingenieriles.

Los relaves también pueden ser clasificados según el contenido de agua (Tabla 2.13) presente en su composición.

Tabla 2.13: Tipos de relaves según el contenido de agua (MINEM, 2003; Ramírez, 2007; Engels, 2017).

Tipo	Descripción
Relaves espesados	Previamente sometido a un proceso de sedimentación en el equipo denominado espesador que favorece la sedimentación de los sólidos, hasta por lo menos 50-60% de sólidos en peso, con el objetivo de retirar parte importante del agua contenida, que puede ser reutilizada para reducir el consumo hídrico de fuentes de agua limpia (Figura 2.13a).
Relaves filtrados o deshidratados	Similar al espesado, contiene aún menos agua, debido al proceso de filtrado en filtros de prensa (presión), filtros de vacío, filtros de faja o centrifugas (Figura 2.13b). Para asegurar así una humedad hasta 20 o 25% por peso (según la gravedad específica del relave). Con esto se permite su transporte y ubicación hacia el depósito por fajas transportadoras o por equipos de movimiento de tierra.
Relaves en pasta	Corresponden a una mezcla de abundantes partículas finas con bajo contenido de agua, de modo que tenga una consistencia espesa similar a una pulpa de alta densidad. Una proporción adecuada para la disposición del relave es tener al menos un 15% de concentración en peso de partículas de tamaño menor a 20 μm (micrones). La mejor propiedad de estos es que pueden ser transportados en tuberías sin los problemas de segregación o sedimentación que ocurren normalmente en las pulpas de relaves (Figura 2.13d).

La terminología de relaves “secos” con el cual se denomina a los relaves filtrados o deshidratados en algunos países, no es estrictamente correcta, debido a que los relaves aún contienen humedad significativa (MINEM, 2003).

En la Figura 2.13a, se observa la descarga de relave espesado, se diferencia el estado inicial al ser depositado y agrietamiento por desecación, la descarga de relaves rellena las grietas de los relaves depositados. El agua presente en la mezcla con el relave, se acumula en las playas o estanques de decantación que se forman dentro del depósito.

El proceso de filtrado para reducir la humedad se realiza en planta con el empleo de prensas que ejercen presión sobre el relave para expulsar agua (Figura 2.13b). La

descarga de estos relaves filtrados se realiza mediante fajas transportadoras o equipos de carga (Figura 2.13c).

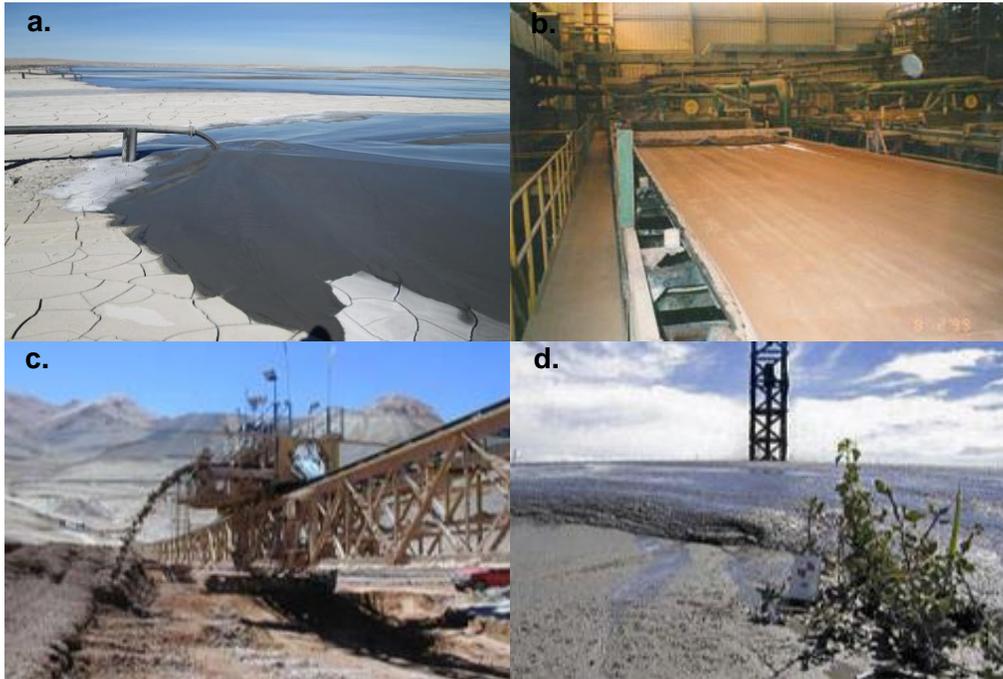


Figura 2.13: a) Relaves espesados, b) filtrado de relaves, c) relaves filtrados, y d) relaves en pasta (Engels, 2017; Martin et al., 2002).

2.4.2 Propiedades químicas, físicas y mecánicas de los residuos mineros

Estas propiedades son importantes para comprender cómo responderá el depósito a las cargas de gravedad impuestas, a la infiltración y al movimiento sísmico (Tabla 2.14). Caracterizar el residuo por sus propiedades químicas, físicas y mecánicas permitirá predecir el comportamiento durante las diferentes etapas de operación de la mina.

Tabla 2.14: Propiedades químicas y físicas de residuos (Vick, 1990).

Propiedad	Descripción
Química	Es aparente que desde un punto de vista físico los residuos mineros son materiales procesados y no procesados. Esto no ocurre, con respecto a las características químicas que pueden variar ampliamente de un yacimiento a otro. Se menciona que varios depósitos de características diferentes con distinta geoquímica, pueden ser explotados a lo largo de la vida de la mina, ocasionando variaciones en las características químicas de los residuos.
Física y mecánica	Son aquellas características geotécnicas que gobiernan su comportamiento frente a la estabilidad, infiltración y deformación. Las propiedades estructurales básicas, incluyen resistencia, permeabilidad y compresibilidad.

Los residuos pueden presentarse en estado sólido o líquido, y estarán en función del tipo de tratamiento sometido. La adición de soluciones líquidas y el contenido de agua con el cual se emiten de las plantas de concentrado, proporcionará las bases para definir el tipo de disposición y método de depositación.

3 DISPOSICIÓN Y DISEÑO DEL ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS MINEROS

Los depósitos generalmente eran ubicados cerca de ríos o arroyos con el objetivo de aprovechar el flujo de agua para abastecer la mina y en especial para el uso en los procesos de las plantas de beneficio (molienda, flotación) y para el transporte de los residuos hacia los depósitos emplazados en menores cotas.

Inicialmente no existían equipos de movimiento de tierra, esto no permitía la construcción de depósitos para almacenar residuos, como resultado, los mineros desarrollaron un procedimiento de construcción, conocido actualmente como el método aguas arriba. Este método de construcción empezó a presentar deficiencias por el inadecuado comportamiento ante eventos sísmicos. Esto provocó el desarrollo de nuevos métodos de construcción, disposición y métodos de descarga para mejorar el rendimiento y la seguridad de los depósitos de residuos. En este capítulo se detallarán las formas de almacenamiento, disposición y el diseño de los depósitos según el material a depositar.

3.1 Tipos de almacenamiento de residuos mineros

Los tipos de almacenamiento pueden ser del tipo superficial, empleando pozos a cielo abierto en etapa de cierre, excavaciones de mina subterránea y disposición acuática.

3.1.1 Almacenamiento superficial

Son tradicionalmente los métodos más versátiles y económicos para disponer los residuos en la mayoría de operaciones mineras. Estos depósitos se pueden dividir en dos tipos: vertederos y depósitos o embalses (Blight, 2010).

Vertederos

En este tipo de depósitos se almacenan materiales como roca de desecho o material mineralizado de bajo grado que no es económico procesar, material de sobrecarga, reservas de minerales y reservas de coberturas vegetales (top soil). Estos se disponen mecánicamente en estado húmedo o semiseco, con o sin alguna forma de compactación (Figura 3.1a). El método de colocación o almacenamiento puede ser por medio de transporte, apilamiento, lanzamiento u otro tipo de maquinaria empleada para su traslado y colocación (Figura 3.1b). Desde el punto de vista operativo, el método presenta ventajas, sin embargo, presentan inconvenientes de:

- El material se deposita en estado suelto, por tanto, puede ser relativamente permeable y acumular un alto contenido de agua, resultado de la infiltración de la lluvia desde la superficie.
- La imposición de una gran altura de material sobre los estratos de la cimentación en un espacio de tiempo relativamente corto producirá elevados esfuerzos de corte y puede llevar a condiciones que provoquen la falla de la cimentación.
- Si la superficie es permeable, la infiltración contiene sales o ácidos disueltos de los residuos puede representar una fuente de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, sin embargo, se reducirá significativamente si la superficie del vertedero ha sido compactada, resultando menos permeable.

Los materiales que conforman los vertederos de rocas se componen mayormente de fragmentos de rocas angulares con partículas finas. En vertederos de coberturas vegetales estos contienen suelos con material orgánico.

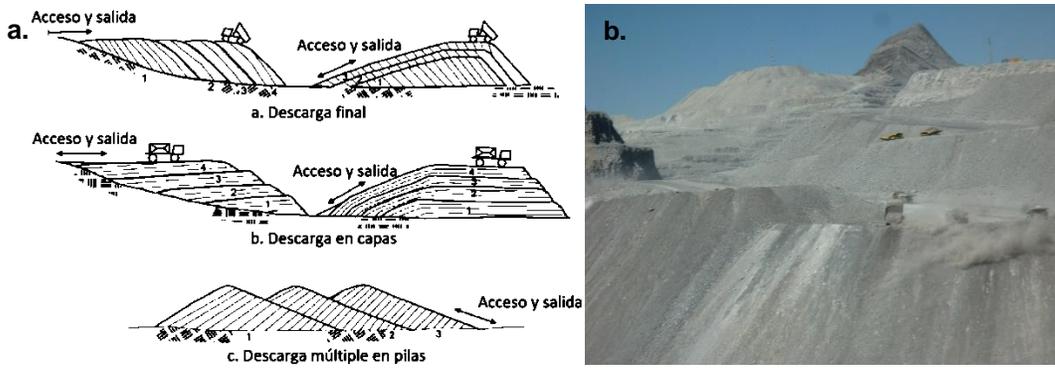


Figura 3.1: a) Tipos de formas de almacenamiento en vertederos, b) vertedero de rocas en operación (modificado de Blight, 2010).

La configuración utilizada para un vertedero es dependiente de la topografía, en el caso de contar con superficies planas o llanas la configuración apilada se presenta apropiada (Figura 3.2a), pero en terrenos montañosos es aplicable los vertederos tipo ladera, de valle o plataforma (Figura 3.2b, 3.2c y 3.2d).

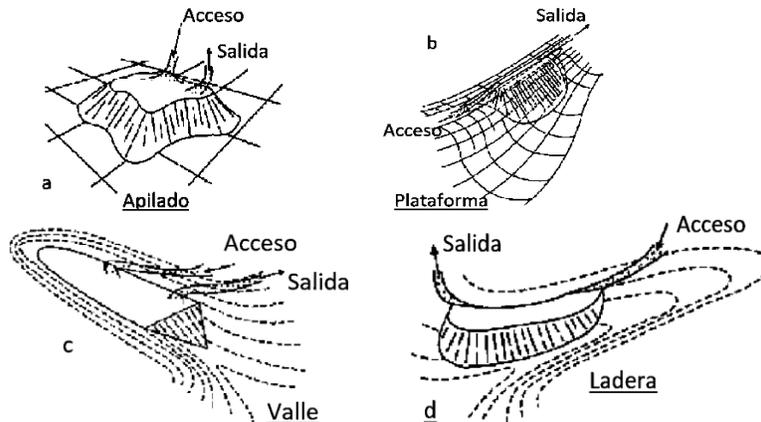


Figura 3.2: Tipos de vertederos de residuos definidos por la topografía, a) apilado, b) plataforma, c) valle y d) ladera (modificado de Blight, 2010).

Embalses o depósitos

Es aquel depósito donde el muro de contención está construido de material de préstamo (suelos y rocas aledañas) o con residuos minero (Tabla 3.1):

Tabla 3.1: Almacenamiento tipo embalse (modificado de Blight, 2010).

Ítem	Tipo	Descripción
1	Valle cruzado	Se sitúa en la cabecera del valle para limitar la captación externa, por lo general implica menos material de terraplén que el embalse tipo anillo, además, puede construirse en altura o construyendo múltiples embalses (Figura 3.3b)
2	Dique de anillo	Se construye un terraplén para encerrar un espacio que se utiliza para contener los residuos (Figura 3.3a). Se construyen generalmente en zonas bastante llanas, ajustándose al terreno y no capta la escorrentía de cuencas externas.
3	En tajos abiertos	Consiste en disponer material en un pozo previamente minado. Las pequeñas cantidades de desechos nocivos presentes se pueden derivar en pozos impermeables para su posterior tratamiento. Se minimiza la dispersión de los relaves debido al viento, dado que están protegidos por las paredes del pozo (Figura 3.3c).

Estos depósitos pueden tomar una variedad de formas (Figura 3.3), pero todos se caracterizan por el hecho de que retengan material de grano fino que normalmente se deposita hidráulicamente. El residuo de grano grueso es descargado en el talud aguas abajo.

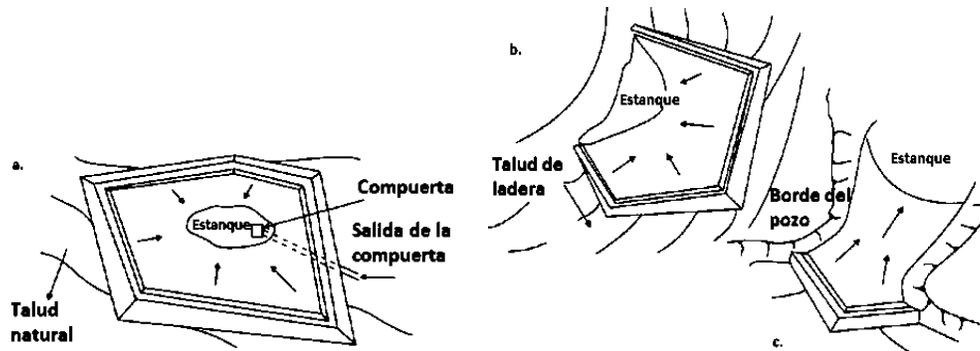


Figura 3.3: Formas de embalse para almacenamiento de residuos, a) dique tipo anillo, b) dique tipo valle cruzado y c) pozo existente en cierre (modificado de Blight, 2010).

La elección del tipo de almacenamiento superficial depende de variables que involucran aspectos ambientales y sociales. Por tanto, la disposición de residuos está en debate respecto al equilibrio entre los beneficios que la actividad minera puede aportar a la sociedad y el costo de los impactos asociados con estas actividades.

3.1.2 Almacenamiento en minas a cielo abierto y mina subterránea

Con este tipo de almacenamiento es posible retornar prácticamente la mitad y hasta dos tercios de los relaves producidos hacia las labores explotadas en las minas subterráneas (Figura 3.4). El relleno, como se denomina a este procedimiento, es parte esencial de algunas operaciones subterráneas como el procedimiento de corte y relleno, y puede también ser utilizado para incrementar la recuperación y extracción de mineral mediante el reemplazo de los pilares de sostenimiento en las operaciones subterráneas del tipo de cámaras y pilares.



Figura 3.4: Depósito de relaves en una mina a cielo abierto en cierre (European Commission, 2004).

Este método aparentemente atractivo de disposición que consiste en descargar los residuos mineros en antiguos trabajos de excavación a cielo abierto o subterráneo. Esto presenta un método de eliminación de bajo costo, pero podría ocasionar problemas de contaminación. Se debe realizar una evaluación para evitar problemas

de filtración en el suelo y posterior contaminación de acuíferos o fuentes de agua superficiales.

3.1.3 Almacenamiento acuático

Se refiere a la descarga de relaves al océano a través de un punto de descarga diseñado adecuadamente a una profundidad y ubicación, seleccionadas para minimizar los impactos ambientales, tales como turbidez y su efecto sobre los peces. El monitoreo oceanográfico, batimétrico, químico y biológico ha mostrado que los relaves floculan y se asientan rápidamente bajo la influencia combinada de los aditivos de la concentradora y el pH del agua de mar es ligeramente alcalino, con algunas fracciones de suspensión de relaves y turbidez en la columna de agua (Figura 3.5). El planeamiento, diseño y monitoreo de la descarga submarina de relaves debe tomar en cuenta la acción de la corriente, así como, los efectos de terremotos y tsunamis en la estabilidad a largo plazo de los residuos (Lottermoser, 2010).

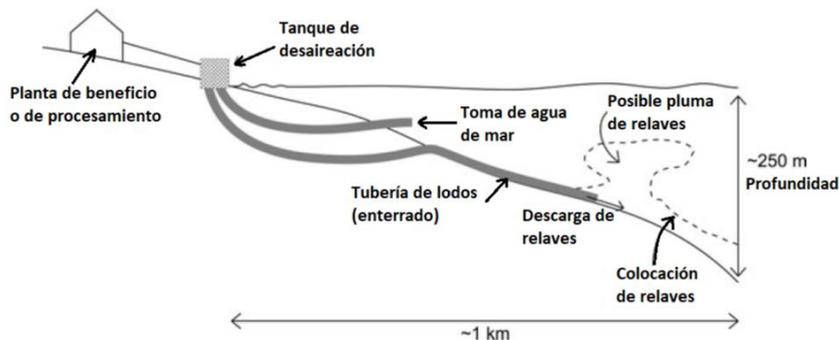


Figura 3.5: Esquema de la sección transversal de la disposición de relaves en aguas profundas (modificado de Lottermoser, 2010).

Mientras que al mismo tiempo se evita, desborde y los riesgos de estabilidad relacionados a los depósitos superficiales, sin embargo, existen problemas pendientes como la alteración y afectación de la vida acuática.

3.2 Diseño de depósitos de residuos mineros

Los residuos mineros se almacenan en depósitos diseñados para cumplir exigencias medioambientales con el fin de que aisle completamente los residuos depositados del ecosistema circundante. En esta se incluyen las características como la geología, sismicidad, clima, áreas de captación aguas arriba, selección de tipos de terraplén y procedimiento de construcción, así como identificación de factores de riesgo como lluvia intensa, inundaciones, sismicidad (Rico et al., 2008). El objetivo principal del diseño es lograr un depósito de residuos postoperatorio seguro y estable (Davies et al., 2002). Para esto, algunos países como México, Perú, Chile, EE.UU, Canadá entre otros, cuentan con guías, manuales o recomendaciones mínimas de diseño.

Durante el diseño de un depósito de relaves este debe diseñado para que sea estético, ecológico, seguro y económico (Orozco, 2014). La Asociación Minera de Canadá en 2011 definió el concepto de las bases y criterios de diseño para la construcción de depósitos mineros (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Criterios y bases de diseño de depósitos de residuos (modificado de Asociación Minera de Canadá, 2011).

Método	Descripción
Bases de diseño	<p>Direccionan las condiciones presentadas en el lugar, requerimientos y regulaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Características del sitio, capacidad de la cuenca, registros, hidrología, vida operacional, restricciones del emplazamiento, peligros naturales, condicional climatológicas, cambio de elevación y distancia del molino, condiciones de cimentación, geología superficial y del basamento rocoso. • Requerimientos de operación, reserva de minerales, vida de la mina, rendimiento anual, densidad de la pulpa del relave para transporte en tuberías, producción de relaves y tasas de aportación de la cuenca, cronograma de almacenamiento del depósito, características del relave (granulometría, química, mineralogía, densidad seca asentada), procedimientos de almacenamiento del residuo, química del agua de lodo, ancho de la cresta del dique, ancho de la playa de relaves y taludes, estándar de calidad de aguas superficiales y subterráneas, balance de agua, producción del molino, capacidad de la planta de tratamiento, manejo del agua, borde libre del estanque, asentamiento y consolidación, regulaciones, potencial de drenaje ácido, tiempo de retención del estanque, estanque químico, medidas de control de infiltración del estanque, superficie perimetral y del agua subterránea, desviación del agua de escorrentía del área de captación, cierre y recuperación.
Criterios de diseño	<p>Son el conjunto de normas y regulaciones establecidas por la práctica ingenieril según las bases de diseño:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Altura máxima y taludes del depósito. • Materiales y método de construcción. • Criterio de diseño sísmico. • Etapas de desarrollo, límites de infiltración y deformaciones. • Licuación y compactación. • Criterios de almacenamiento y encauzamiento de inundaciones. • Factores de seguridad para los taludes del depósito en etapas de operación y cierre. • Clasificación de las consecuencias de falla de los depósitos y riesgo aceptable.

Para que un depósito de residuos se mantenga en óptimas condiciones de operación deberán contar con sistemas que permitan el transporte de planta al lugar de disposición, sistemas de manejo de líquidos, estructuras de contención, entre otros elementos y sistemas que en su conjunto aseguren un adecuado comportamiento en la etapa operacional y la etapa de cierre (Tabla 3.3).

Tabla 3.3: Componentes típicos de depósitos mineros (modificado de Asociación Minera de Canadá, 2011).

Manejo de relaves/agua		
Diques y estructuras de contención. Playas de relaves. Taludes de contención. Cresta del dique del depósito. Diques de arranque y bermas. Área de embalse. Accesorios. Vegetación. Sistemas de control de residuos.	Cunetas y zanjas. Alcantarillas. Drenes. Estructuras de caída. Revestimientos. Estructuras de control. Tuberías de relaves y agua. Cuartos de bombas y bombas. Puentes de tuberías.	Agua. Sistemas de bombeo y zanjas de recuperación de infiltración. Estructuras de decantación. Vertederos. Sifones. Barcazas de recuperación. Derivadores de arroyos. Derivadores de zanjas. Planta de tratamiento de agua.
Infraestructura		
Corredores de servicios públicos. Líneas de gas y productos. Caminos, rampas, edificios.	Telecomunicaciones. Líneas de transmisión. Interruptores.	Recintos. Señalizaciones. Puertas y cercas.
Instrumentación		
Piezómetros. Pozos de agua subterránea. Vertederos.	Inclinómetros. Monumentos superficiales. Controles computarizados.	Medidores de densidad del relave. Medidores de nivel de agua.

3.2.1 Variables de diseño

Factores específicos del residuo minero

La composición de los residuos, la densidad, la clasificación y otras características, son empleadas para el diseño de depósitos, teniendo en cuenta (Vick, 1990):

- Análisis de los residuos mineros para evaluar el uso de arenas en la construcción del terraplén,
- Su impacto sobre la estabilidad estructural y las características de la filtración, y
- El análisis mineralógico para determinar los aspectos químicos potenciales de la filtración u otras descargas del depósito.

Los residuos mineros del tamaño de arenas suelen utilizarse como fuente de material para la construcción de terraplenes, considerando que al trabajar con arenas en la construcción de los terraplenes del dique de contención se reduce el volumen de residuos a depositar. La distribución del tamaño de los granos de los residuos se puede obtener mediante el empleo de hidrociclones, separando cantidades suficientes de arena para construir el terraplén, dejando los sedimentos de menor tamaño para ser depositados y ubicarlos detrás del terraplén (zona aguas arriba) con el objetivo de reducir posibles problemas de filtración.

Con respecto a las propiedades físicas, los residuos se consideran como suelos, sujetos a los patrones tradicionales de comportamiento de la mecánica de suelos. Las propiedades índices como gradación, gravedad específica y plasticidad se determinan en los residuos producidos durante la etapa de molienda. Estas pruebas índices son una guía para las propiedades ingenieriles; sin embargo, se requiere precaución ya que estos difieren sutilmente de los suelos que tienen propiedades índice similares (Vick 1990). Además de las características que afectan la estabilidad y la cantidad de filtración, se deben analizar para determinar la calidad del agua de filtración e identificar contaminantes como el arsénico, cobre, plomo, entre otros, además, de contener niveles significativos de radioactividad.

Factores específicos de sitio

Se deben describir las condiciones físicas de sitio que proporcionen la base para el diseño y operación del depósito que incluyen (Asociación Minera de Canadá, 2011):

1. Físicas, volumen de relaves y el área requerida.
2. Financieras, la cantidad y el costo del material de relleno, los controles de agua y los métodos de almacenamiento.
3. Requisitos ambientales, control de inundaciones, contaminación de aguas subterráneas y de aguas superficiales, y hábitat de vida silvestre.

La importancia de cada uno de estos criterios puede variar dependiendo de la operación y del sitio a evaluar (Vick, 1990).

Blight en 2010, señala siete factores que harían que un prospecto de sitio de almacenamiento fuera rechazado. Estos son: 1) zonas inundables con periodos de retorno $T < 50$ años; 2) zonas próximas (< 100 m) a ríos, lagos y presas; 3) zonas de inestabilidad geológica, por ejemplo, fallas, calizas kársticas, entre otros; 4) zonas arqueológicas; 5) zonas de recarga de acuíferos; 6) zonas cuyo uso de suelo no sea

compatible con la actividad minera; 7) zonas cuyos vientos dominantes arrastren polvos del almacén hacia comunidades, bosques o terrenos agrícolas colindantes (Jaime, 2011). En la Tabla 3.4, se presentan las condiciones específicas a considerar en el diseño de un depósito de residuos mineros:

Tabla 3.4: Condiciones específicas de sitio (Rennat 1997, Asociación Minera de Canadá, 2011).

Factores	Descripción
Ubicación de la planta concentradora o de beneficio	Los residuos tipo relaves se transportan generalmente desde el molino. Se requiere un extenso sistema de tuberías, así como para el bombeo del agua de recuperación al molino. Idealmente, los sitios están en cotas inferiores respecto al molino para permitir el flujo por gravedad de los residuos al depósito y minimizar costos de bombeo.
Clima	La lluvia y los deshielos controlan el manejo del agua y los requerimientos extremos de inundación para los depósitos de superficie y junto con la evaporación, influyen en la movilidad del contaminante y las propiedades físicas de los relaves depositados. Se deberán contar con registros de precipitaciones, sequías, temperatura, evaporación, heladas, temperatura, vientos, eventos temporales y extremos, calidad del aire.
Topografía	El objetivo es lograr la máxima capacidad de almacenamiento con la menor cantidad de relleno para formar el depósito, se deben investigar generalmente primero las topografías que presentan valles o depresiones. La topografía es importante (ICOLD, 1996): <ul style="list-style-type: none"> • El tipo de depósito más económico que pueda realizarse. • Método de descarga, puede ser desde arriba o abajo. • Las dimensiones del dique, que dependen del volumen y espacio para el almacenamiento, además, de la velocidad de llenado del depósito. Los mapas deben incluir: curvas de nivel, afloramiento de rocas, áreas boscosas, drenajes superficiales y subterráneos, caminos de acceso, ubicación de ríos, viviendas, infraestructura existente y demás elementos que puedan verse afectados o afecten la construcción del depósito. Como regla general, las alturas del terraplén se mantienen por debajo de 60 m. Los terraplenes altos (más de 120 m) a menudo presentan problemas de diseño y de construcción que podrían evitarse con una mejor ubicación.
Hidrología	Se requiere información del caudal de las corrientes de agua superficiales como ríos o arroyos, estanques o lagos, condiciones marinas, áreas de captación, identificación de zonas de inundación, ubicación y registro de variaciones del nivel freático. Los factores hidrológicos de las aguas superficiales generalmente favorecen la desviación del agua alrededor y la minimización de las entradas de agua en el depósito. Si es posible, esto se logra situando el depósito lo más cerca posible del inicio de la cuenca para minimizar los costos de construcción de estructuras de desviación de agua superficial. Para evitar excesivos requerimientos de manejo del agua, el área total de la cuenca debe ser menor de 5 a 10 veces la superficie del depósito. Debe haber provisiones para controlar tormentas y escorrentías después de estar fuera de operación.
Geología	El uso de mapas y documentos existentes complementados con trabajos de exploración como pozos a cielo abierto, zanjas, galerías, perforaciones con muestreo, además de pruebas geofísicas, geomorfología, factores geológicos generales, incluyendo la disponibilidad de materiales de construcción, problemas especiales de construcción con respecto a las estructuras cercanas, condiciones de drenaje y aparente estabilidad del sitio (caída, evidencia de planos débiles dentro de la roca, etc.).
Hidrogeología	Las condiciones de las aguas subterráneas suelen estar relacionadas con la geología, y también afectan las condiciones de ubicación. Un nivel de agua alto limita la cantidad de material de préstamo seco disponible para la construcción y acorta la distancia de infiltración para entrar en el sistema de aguas subterráneas. El agua subterránea poco profunda puede infiltrar los residuos y aumentar los niveles de agua en el depósito.
Geotecnia	Características de depósitos superficiales y del basamento rocoso (contenido de humedad, granulometría, mineralogía, geoquímica, resistencia al corte, compresibilidad, permeabilidad y ensayos índice), estratigrafía.
Sismicidad	Se tiene que considerar la actividad sísmica. Se requiere la selección de un sismo de diseño para la zona en estudio y se hacen uso de leyes de atenuación que son empleados para estimar la magnitud de las fuerzas sísmicas. Un método comúnmente usado para determinar los efectos del terremoto de diseño en un sitio particular es asumir que el terremoto ocurre en la posible zona activa de falla más cercana. La falla se selecciona sobre la base de los estudios geológicos realizados previamente en la zona.
Biológicos	Identificación de la flora y fauna presente en la zona de emplazamiento del depósito.

La disposición de residuos mineros está en función del material a disponer, las características físicas y químicas, condiciones específicas de sitio como disponibilidad de áreas, topografía, condiciones climáticas y la normativa de cada país.

3.2.2 Métodos de construcción con residuos mineros y método convencional

Los depósitos de residuos se construyen mediante la elevación de muros de contención o en depresiones naturales, ajustándose a la topografía de la zona asignada para la construcción del depósito. Existen cuatro principales métodos para la construcción de depósitos, tres métodos con el uso de residuos como material de construcción y un método tipo embalse de agua que hace uso de materiales de préstamo (Tabla 3.5). Estos métodos permiten en la mayoría de casos aumentar la capacidad de almacenamiento de residuos mediante recrecimientos por etapas.

Tabla 3.5: Tipos de métodos de construcción de depósitos de residuos (modificado de Vick, 1990; USEPA, 1994; Icold, 1996 y Blight, 2010).

Tipo	Descripción
Método aguas arriba	<p>El dique de arranque es esencialmente un terraplén o dique de contención con sistema para la línea de descarga y se construye en algunos casos con roca de desecho de comportamiento permeable para permitir el drenaje del agua de infiltración y para controlar la erosión. También puede ser construido de relleno relativamente impermeable o incluso relaves secos conformados y compactados. La descarga se debe controlar con espigas para asegurar que los residuos de arena más gruesos se depositen cerca del dique de arranque, el estanque de agua (estanque de decantación) debe mantenerse alejado del borde del almacenamiento; si se permite acercarse a la orilla, las presiones piezométricas serán altas y generan inestabilidad del talud, además de problemas de erosión interna (Figura 3.6a). Es adecuado para relaves provenientes de roca dura, arena limosa o con alto contenido de arcilla.</p> <p>Es probable que los relaves gruesos tengan una densidad relativa baja a media. Si éstos se saturan y son sometidos a movimientos sísmicos, pueden licuarse, dando lugar a una falla de talud con posterior flujo de relaves; por tanto, no es aplicado en zonas de alta sismicidad.</p>
Método aguas abajo	<p>El terraplén está construido de material seleccionado. En el caso de la Figura 3.6b, se ha utilizado una sección transversal tipo barrera de almacenamiento de agua, con una zona impermeable aguas arriba y un control de drenaje interno. Esto permite almacenar el agua adyacente al terraplén. Para evitar problemas de erosión interna y de las tuberías se tiene en cuenta que el estanque de agua se mantenga alejado del dique para así controlar la posición de la superficie freática. Se tiene en cuenta que:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El terraplén presenta mejor comportamiento si es construido con material permeable para controlar presiones piezométricas. • Es deseable, pero no necesario, colocar los relaves de manera controlada. Sería importante espigar o ciclonear los relaves para formar una playa relativamente arenosa adyacente a la zona aguas abajo y así controlar las presiones piezométricas. <p>Este método es más estable, pero más costoso debido a la cantidad de material requerido para elevar el terraplén.</p>
Método del eje central	<p>El dique debe estar construido, al menos en parte, de material permeable para permitir el control de la presión piezométrica, el estanque de agua debe mantenerse alejado del borde del dique para evitar la acumulación de presiones piezométricas excesivas y controlar el potencial de erosión interna y tuberías. Es esencial que los relaves se coloquen de manera controlada y requieren ser compactados para asegurar que no ocurra problemas de licuación bajo sismos y provoque desborde de los relaves (Figura 3.6c).</p>

Continuación de Tabla 3.5: Tipos de métodos de construcción de depósitos de residuos (modificado de USEPA, 1994; Icold, 1996 y Blight, 2010).

Tipo	Descripción
Tipo presa de almacenamiento de agua	<p>A menudo se usan depósitos convencionales tipo vertedero, suelo o concreto para almacenar residuos tipo relaves (Figura 3.7).</p> <ul style="list-style-type: none"> • El agua de infiltración de los residuos a menudo tiene un alto contenido de sales, lo que suprime la probabilidad de dispersión de arcillas y puede permitir el uso de filtros menos controlados. • La fuga de agua de la presa puede no ser crítica, permitiendo el uso de material de mayor permeabilidad en núcleo, si el agua está contaminada, puede ser necesario captar estas aguas para posterior tratamiento. • A menudo hay una gran cantidad de roca disponible en la operación minera que puede ser utilizada para reducir los costos de construcción. El relleno debe ser compactado para limitar los asentamientos.

Como se observa en las Figuras 3.6a, 3.6b y 3.6c, los métodos de construcción con material de residuo se inician con un dique inicial (dique de arranque), que luego se eleva por etapas para aumentar la capacidad de almacenamiento.

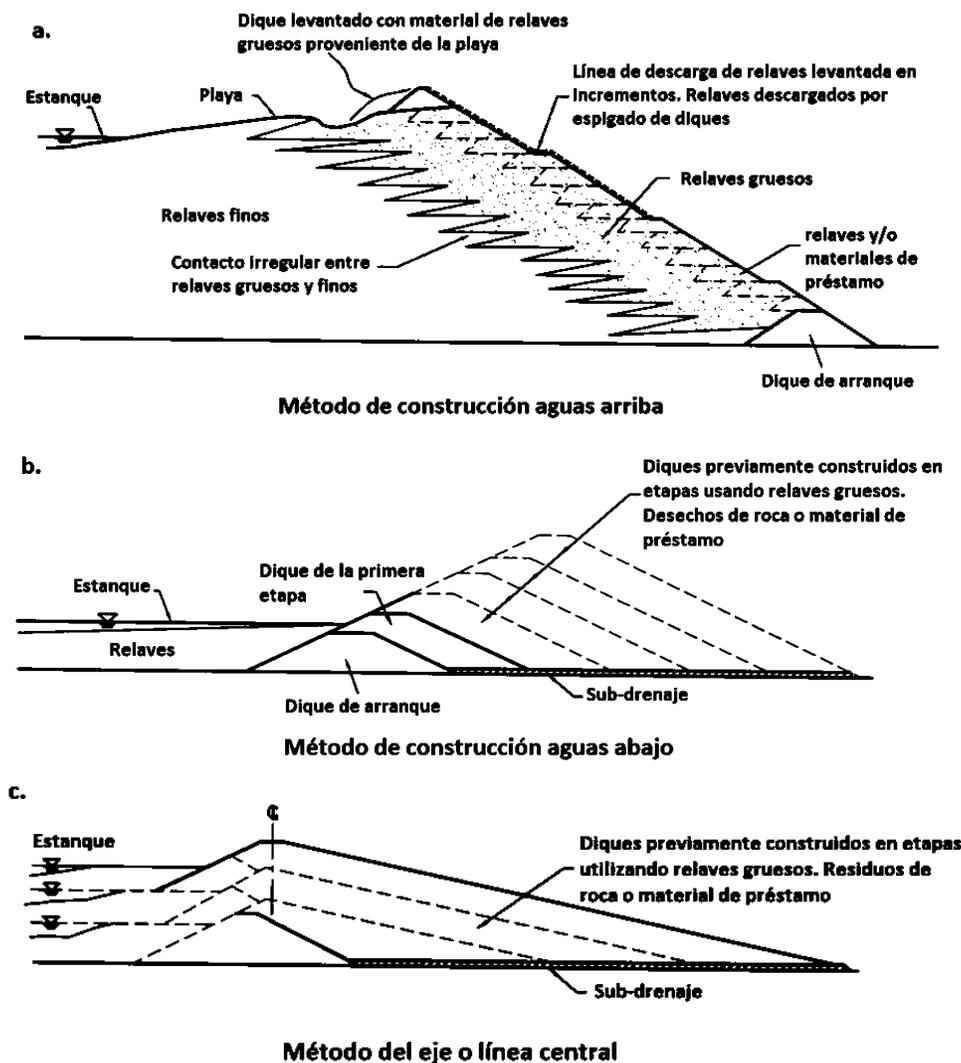


Figura 3.6: Métodos de construcción de depósitos de residuos mineros tipo relaves (modificado de Vick, 1990; Martin et al. 2002).

El método de construcción aguas arriba está prohibido en varios países como es el caso de Chile, ejemplo que se ha seguido progresivamente en los demás países con operaciones mineras y altamente sísmicas (Ramírez, 2007).

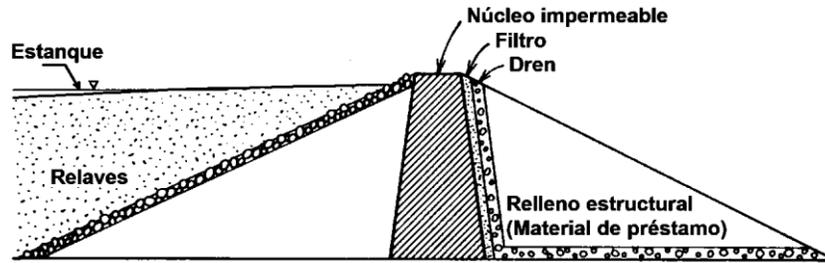


Figura 3.7: Métodos de construcción tipo presa de almacenamiento de agua (modificado de Vick, 1990; USEPA, 1994).

Se presenta un resumen comparativo del tipo de almacenamiento de depósito y el método de construcción (Tabla 3.6).

Tabla 3.6: Comparación de depósitos de relaves (modificado de Vick, 1990).

Tipo de depósito	Tipo embalse de agua	Aguas arriba	Aguas abajo	Eje central
Requerimientos de residuos	Adecuado para cualquier tipo de relave	Al menos 40-60 de arena del total de relaves. Bajo contenido de sólidos en la descarga deseable para promover segregación de tamaño de grano.	Adecuado para cualquier tipo de relave	Arenas o limos de baja plasticidad
Requerimientos de descarga	Adecuado para cualquier procedimiento de descarga	Descarga periférica de espiga y playa controlada	Variable según detalles del diseño	Se requiere descarga periférica de por lo menos la playa nominal
Capacidad de almacenamiento de agua	Bueno	No es adecuado para almacenamiento de agua.	Bueno	No recomendado para almacenamiento permanente. Almacenamiento temporal de inundaciones aceptable con detalles de diseño apropiados.
Resistencia sísmica	Bueno	Pobre en zonas de alta sismicidad.	Bueno	Aceptable
Restricciones para recrecimiento	Terraplén construcción al inicio o por etapas	Deseable para menos de 5-10 m/año.	Ninguno, a menudo construido en etapas si se utiliza relleno rocoso.	Pueden aplicarse restricciones de altura para los recrecimientos.
Requerimientos de relleno de terraplén	Material de préstamo de suelo o roca (residuos mineros, filtrados)	Suelo natural, arena de relave o residuo minero.	Relaves de arena o residuos mineros si las tasas de producción son suficientes o rellenos de suelo o roca	Relaves de arena o residuos mineros si las tasas de producción son suficientes o rellenos de suelo o roca
Costo relativo del dique	Alto	Bajo	Alto	Moderado

Según la Tabla 3.6, los métodos de construcción aguas abajo y eje central se presentan adecuados para zonas de alta sismicidad, pero con mayores costos de construcción. El método aguas arriba se está dejando de emplear, porque no permiten construir un sistema de subdrenaje adecuado, para disminuir las presiones de poro y las fuerzas de filtración.

3.2.3 Métodos de descarga en depósitos de relaves

Estos métodos (Tabla 3.7) se realizan a través de sistema de bombeo desde la planta hasta el lugar de disposición, el relave es transportado por medio de tuberías u otros equipos empleados para su transporte. A continuación, se describen algunos de los métodos de descarga de mayor aplicación:

Tabla 3.7: Métodos de descarga en depósitos de relaves (modificado de Ramírez, 2007; Blight, 2010).

Método	Descripción
Descarga sub-aérea	Se descargan en capas delgadas a partir de distribuidores espaciados, muy cerca uno del otro. Al dejarse secar bajo climas secos y calurosos, resultan en depósitos que tienen un alto grado de sobreconsolidación y alcanzan presiones de agua negativas (succión capilar), con esto mejoran las características físicas en comparación con los lodos depositados convencionalmente. Las condiciones de no saturación a través del depósito pueden ser alcanzadas únicamente mediante una adecuada duración y grado de secado de las capas de relaves durante el almacenamiento, que depende de las características de la evaporación y procedimientos operativos.
Descarga sub-acuática	Adecuada para residuos que contienen sulfuros propensos a oxidarse, movilizar metales y producir ácido. La restricción del oxígeno a los relaves al colocarlos permanentemente bajo el agua evitará la oxidación y minimizará los problemas ambientales asociados con el drenaje ácido de mina (AMD).
Descarga con sistema de espigas	Se utiliza el sistema de espigas donde los relaves se descargan generalmente alrededor del perímetro del depósito para crear una playa entre el terraplén y el estanque sobrenadante. La operación continúa cambiando la ubicación del sistema de espigas según el plan de almacenamiento para promover el secado antes de colocar una capa adicional y continuar con el aumento de la elevación del depósito.
Descarga de punto único	Requiere un movimiento irregular de las líneas de descarga. Esto normalmente significa que el estanque está restringido a una cierta zona del embalse que puede estar contra una de las paredes de terraplén que resulta en extremos altos y bajos del embalse. El extremo inferior del embalse recogerá los sedimentos aumentando la posibilidad de erosión por filtración. Esta descarga no es adecuada cuando el estanque y/o los sedimentos deben mantenerse alejados de dique de contención.

En la Figura 3.8, se presenta la descarga con sistema de espigas en la corona de un terraplén de un depósito de relaves. Con este tipo de descarga es posible la separación de residuos finos de los residuos gruesos.

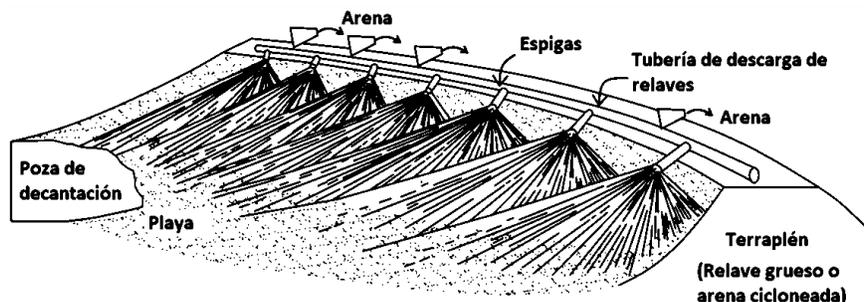


Figura 3.8: Descarga con espigas de arenas de relave en un depósito (modificado de Valenzuela, 2016).

El contenido de agua y el peso volumétrico son de importancia en los trabajos de descarga (Tabla 3.8). Estos valores dependen del sistema de descarga empleado, mencionando a la descarga con espigas, descarga con hidrociclones o por otro medio de transporte empleado durante el almacenamiento en el depósito.

Tabla 3.8: Contenido de agua y peso volumétrico según el tipo de descarga (Blight, 2010).

Tipo de descarga	Contenido de agua (%)	Peso volumétrico (t/m ³)
Convencional	100 - 150	1.3 - 1.5
Espesada o en pasta	Alrededor de 50	1.7 - 1.8
Lodos en mina subterránea	30 - 50	1.7 - 1.9

3.2.4 Tipos de disposición de relaves

La disposición de relaves se da según el contenido de agua presente del residuo. En la Tabla 3.9, se presenta una breve descripción de los tipos de disposición y algunas ventajas y desventajas que fueron expuestas por Engels y Dixon-Hardy en el año 2007.

Tabla 3.9: Métodos de disposición de relaves (modificado de Engels y Dixon-Hardy, 2007; Ramírez, 2007; Blight, 2010).

Tipo	Descripción
Espesados	<p>Robinsky en 1979 desarrolló este método, el cual no requiere de un dique o muro contención en su construcción. El procedimiento se basa en la mayor viscosidad que alcanza la pulpa de relave al aumentar la concentración de sólidos. Se proponen una curva en que relaciona el ángulo de reposo del relave con el contenido de sólidos de la pulpa, de esta manera pueden disponerse los relaves en forma de un cono cuya pendiente será la que corresponde a la respectiva concentración de sólidos.</p> <p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se reduce el costo asociado con el bombeo, no hay presencia de agua almacenada. • Es más estable en áreas de actividad sísmica y más resistente a los eventos de licuación en comparación con un depósito convencional. • No se producen problemas de erosión en el depósito debido al movimiento del agua subterránea y filtración, reduciendo la migración del líquido de relaves al medio ambiente. • Reducción de costos en rehabilitación y cierre y se puede reconfigurar para aceptar otros tipos de residuos en pasta. <p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Altos costos de capital y de operación de equipos de deshidratación. • Depositados los relaves, estos se encuentran expuestos a diversos elementos ya que no están cubiertos de agua.
Filtrados o deshidratados	<p>Similar a los relaves espesados con la diferencia de que el material contiene menos agua debido al proceso de filtrado mediante el uso de equipos similares a los que se emplean para filtrar concentrados, como son los filtros de prensa o de vacío. El relave una vez filtrado se transporta al depósito mediante cintas transportadoras o con equipos de movimiento de tierra (Figura 3.9). En el primer caso, se logra un material similar al método de Robinsky, mientras que en el segundo caso se utilizan los equipos de movimiento de tierras para ir construyendo módulos de material compactado y permite conformar un depósito de gran volumen. La presencia de algunas arcillas, yeso, pueden reducir la eficiencia de filtrado.</p> <p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La alta densidad de los relaves reduce el volumen total del depósito y la estabilidad superficial es más segura que la disposición húmeda convencional, y, permite una instalación rápida. Se reduce la contaminación del agua subterránea. • Útil en climas áridos donde la conservación del agua es un problema, para climas fríos, el apilamiento previene la congelación de tuberías y problemas de formación de heladas en los embalses convencionales. <p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Costos más elevados que el almacenamiento convencional de embalses. • Problemas con el polvo de los relaves que se transportan al aire.
En pasta	<p>Es posible producir materiales con la consistencia de pasta a partir de un amplio rango de concentración de sólidos en peso y sobre la base de la variación de la distribución de tamaño de las partículas. Es decir, la producción de pasta es específica para cada tipo de material. Estos relaves pueden ser transportados en tuberías sin los problemas de segregación o sedimentación que ocurren normalmente en las pulpas de relaves, una vez depositados, se dejan secar, luego acopiar, permitiendo así minimizar la superficie de suelo cubierto con relaves.</p>

Continuación de Tabla 3.9: Métodos de disposición de relaves (modificado de Engels y Dixon-Hardy, 2007; Ramírez, 2007; Blight, 2010).

Tipo	Descripción
Co-disposición de relaves	<p>Consiste en mezclar residuos mineros finos y gruesos (Martin et al., 2002). Este procedimiento reduce los espacios vacíos asociados a los residuos gruesos, aumentando la resistencia de los residuos finos. La resistencia y la rápida estabilización de los residuos de co-eliminación permiten un manejo rápido de los relaves para su estabilización, además, de reducir el riesgo y las consecuencias de las cargas estáticas y dinámicas a las que estarán sometidos.</p> <p>El almacenamiento generalmente no requiere diques de contención, lo que elimina el riesgo de falla de los taludes y posterior flujo de residuos fuera de la zona de almacenamiento. Otra ventaja es que la co-disposición puede reducir significativamente la generación de ácido asociado con los residuos gruesos que contienen sulfuros. La combinación de los dos aumenta la estabilidad física (alta resistencia al corte) y la estabilidad química, reduciendo así la oxidación y la generación de drenaje ácido de mina.</p>

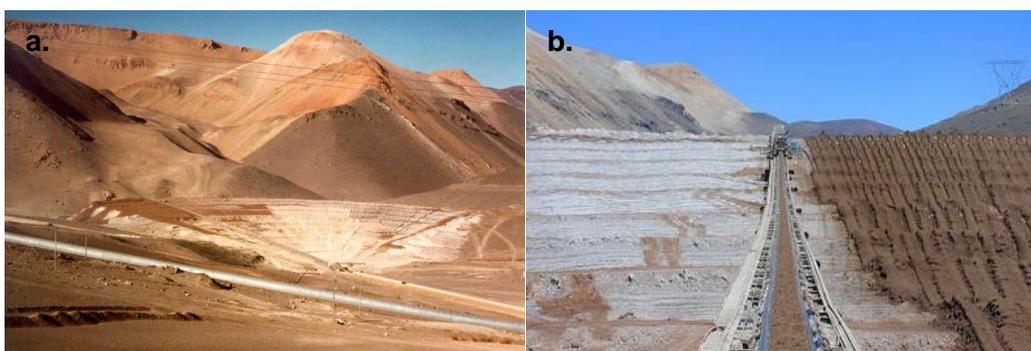


Figura 3.9: Relaves filtrados, a) vista del depósito y b) descarga de relaves (Martin et al., 2002; Engels, 2017).

3.2.5 Métodos combinados de disposición

Alternativamente, las arenas cicloneadas pueden ser retornadas al subsuelo como relleno, mientras que las lamas remanentes son bombeadas a lugares más convenientes que generalmente resultan en distancias mucho mayores. Lottermoser en el 2010, presentó algunos métodos de disposición:

- Una alternativa a la eliminación de los residuos es otorgarles un adecuado uso; por ejemplo, los residuos provenientes de la extracción de manganeso pueden utilizarse en la agricultura como revestimientos, productos de fundición en resina, vidrio, cerámica, esmaltes, así como los materiales de construcción.
- Se plantea en el futuro que los residuos de metales básicos y los minerales metálicos de baja calidad pueden ser utilizados en el sembrado de algunas especies de plantas que extraen metales del sustrato. Puede no sólo recuperar los metales de los desechos, esta técnica también puede convertir los materiales peligrosos en desechos benignos con concentraciones de metal más bajas.
- La carbonatación mineral es un esquema para capturar dióxido de carbono mediante la inducción de la fijación de dióxido de carbono como minerales de carbonato. Éstos son ambientalmente estables y seguros, además, no contaminantes. Sin embargo, este proceso de carbonatación de los relaves ha tenido un estudio muy limitado y el conocimiento de la carbonatación mineral y su posible aplicación como tecnología de captura de carbono presenta hasta el momento varias deficiencias.

Para el almacenamiento convencional, los relaves son generalmente descargados de espigas o emisores situados a lo largo del depósito. Los residuos espesados y en pasta, se descargan generalmente desde una ubicación central, ya sea a través de fuentes puntuales que se elevan durante la vida útil del depósito. El apilamiento de residuos en estado seco se realiza normalmente con apiladores radiales o con unidades de transporte de carga (Davies et al., 2002).

3.3.6 Criterios de diseño para cierre

En una operación minera, la planta de procesamiento de minerales solo funcionará durante algunas décadas, mientras que las instalaciones de relaves y roca de desecho, permanecen mucho tiempo después del cese de las operaciones; por tanto, se debe prestar especial atención al cierre apropiado, la rehabilitación y el cuidado posterior de estas instalaciones.

Los criterios de diseño dependen del tiempo de exposición a peligros como inundaciones y terremotos. Debido a que el período de exposición de depósitos en cierre es perpetuo, deben estar diseñados para soportar eventos más extremos, como el terremoto máximo posible y la inundación máxima probable. Se deben considerar otros aspectos como la resistencia a la erosión del depósito y la durabilidad (resistencia a la intemperie) de los materiales con los que se construye el depósito. En la Tabla 3.10 se presentan dos tipos de cierre:

Tabla 3.10: Tipos de cierre de depósitos mineros (Asociación Minera de Canadá, 2011).

Tipo	Descripción
Cierre "seco"	Cuando el cierre no implica la inmersión de residuos en agua, la práctica requiere la vegetación directa de la superficie de los relaves y/o la cobertura vegetal de la superficie de los relaves con un material que sea más resistente a la erosión que los relaves. Actualmente, se realizan extensos estudios de recuperación (especies apropiadas, disponibilidad y requisitos de la capa superficial del suelo) durante la fase de estudio de factibilidad.
Cierre sumergido de los embalses de relaves	La inmersión permanente de los relaves detrás de un depósito convencional tipo de retención de agua para prevenir la AMD resuelve el principal problema geoquímico, pero impone requisitos más estrictos sobre la seguridad de un depósito de relaves. La seguridad de un depósito no aumentará con el tiempo debido a que no se logra la condición drenada de cierre. El programa de seguridad implementado para la fase de cierre no debe ser menos exhaustivo que uno que se implementaría para una presa de agua con consecuencias de fallas similares.

Las decisiones sobre el manejo de los residuos mineros son alcanzadas a través de una evaluación de impacto ambiental y social realizada antes de la aprobación del diseño del depósito. El volumen cada vez mayor de residuos ha estimulado la investigación de su reciclaje. Los usos alternativos de residuos son dependientes de las características químicas y mineralógicas del mismo. La tecnología tiene el potencial de convertir los residuos que contienen metales en no nocivos. Mientras que los procedimientos sean útiles para algunas operaciones de tajo abierto, para resolver los problemas de disposición que enfrentan las minas subterráneas en áreas restringidas, se requerirá que varios de los métodos de disposición discutidos en este capítulo, sean combinados en forma innovadora, y que se haga del planeamiento de mina, el diseño del proceso y del planeamiento de los residuos, un proyecto integral, reconociendo que una solución en una de las áreas, no es necesariamente la solución óptima.

4 NORMATIVAS AMBIENTALES DE AGUA, AIRE Y SUELO EN MÉXICO Y OTROS PAÍSES

Las normas ambientales son disposiciones legales que establecen cuáles serán los niveles de sustancias contaminantes que serán considerados aceptables y seguros para la salud del ser humano y la preservación del medio ambiente. Por su parte, las normas de emisión establecen límites a la cantidad de contaminantes emitidos al aire, al agua o al suelo que pueden producir las instalaciones mineras, industriales o fuentes emisoras en general. El objetivo de estas normas es la prevención de la contaminación o de sus efectos, o bien ser un medio para reestablecer los niveles de calidad cuando éstos han sido sobrepasados. La presencia de altos niveles de metales, partículas de polvo y gases provocan deterioros en el ser humano y en el medio ambiente (Tabla 4.1).

Los metales pesados según la tabla periódica son elementos químicos con alta densidad, masa y peso atómico (mayor a 20), y son tóxicos en concentraciones bajas. Algunos de estos elementos son: aluminio (Al), bario (Ba), berilio (Be), cobalto (Co), cobre (Cu), estaño (Sn), hierro (Fe), manganeso (Mn), cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), cromo (Cr), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plata (Ag), selenio (Se), talio (Tl), vanadio (Va), oro (Au) y zinc (Zn). En general se considera, que los metales son perjudiciales, pero muchos resultan esenciales en nuestra alimentación y en algunos casos, su deficiencia o exceso puede conducir a problemas de salud, por ejemplo, el organismo requiere de hierro, cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, vanadio, estroncio y zinc. Es importante considerar, que elevadas concentraciones de dichos metales en el organismo de los seres vivos alteran los procesos bioquímicos y fisiológicos ocasionando diferentes patologías (Londoño, Londoño y Muñoz, 2016).

Tabla 4.1: Categoría de contaminantes (Londoño, Londoño y Muñoz, 2016).

Principal categoría	Subcategoría
Física	Sólidos suspendidos Turbidez Color Temperatura Sabor y olor
Química Orgánica	Carbón Aceites y grasas Jabones y detergentes Caucho Tintes y compuestos fenólicos
Química Inorgánica	Metales pesados (Cr, Hg, Cu, Cd, Pb, Zn, etc.) Ácidos Álcalis Cianuro Sales disueltas: <ul style="list-style-type: none"> • Cationes: Mg, Ca, K, Na, Fe, ect. • Aniones: Cl⁻, SO₄⁻², NO₃⁻, HCO₃⁻, etc.
Biológico	Virus, bacterias y microorganismos
Radiológico	Uranio y otras sustancias radiactivas de relaves mineros

El tipo de contaminantes físico y químico son los más críticos en la mayoría de las operaciones mineras. En la tabla 4.2 se resumen algunos de los tipos importantes de contaminantes físicos y químicos que están presentes en la descarga de residuos al medio ambiente.

Tabla 4.2: Tipo de contaminantes presentes en las descargas de residuos de mina (USEPA, 2003).

Tipo	Descripción
Temperatura	Es un indicador importante de la actividad bioquímica. Cada aumento de temperatura de 10 °C duplica la actividad bioquímica, dentro del rango de temperatura de 5 a 30 °C. Las temperaturas más altas pueden provocar la muerte de organismos acuáticos.
pH	Corresponde a la concentración molar de iones hidrogeno en solución. La solubilidad de los metales en el agua depende del pH. Los bajos valores dan como resultado especies solubles y un pH elevado induce la precipitación de óxidos metálicos. El rango de escala de pH de 0 a 14, siendo 7 denominado "pH neutro". Una consideración importante en el alto contenido de azufre es la reacción del azufre, oxígeno y agua, y en presencia de bacterias forma ácido sulfúrico reduciendo el pH.
Sólidos suspendidos	Es la concentración de materia sólida en forma suspendida, son las fracciones de las sustancias no disueltas en una muestra de agua retenida en un papel de filtro de fibra de vidrio de 0.45 µm de tamaño de poro. Consiste en limo y otro material de mineral fino, que tiene la capacidad de permanecer en suspensión durante un período prolongado. Las características de sedimentación de estas partículas varían con el tamaño, la forma, la densidad de la mezcla y varios otros factores.
Sólidos disueltos totales	Se refiere al contenido total de sólidos disueltos de una muestra de agua. Conductividad eléctrica (EC) es la expresión numérica de la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica. La conductividad eléctrica para el agua de la mina puede ser sustancialmente alta debido a la presencia de sales disueltas.
Turbidez	Es una medida de la materia fina suspendida en el agua, esta dispersa la luz y le da un aspecto "nublado". Por tanto, la turbidez es una medida indirecta de la materia suspendida. El aumento de la turbidez en el agua superficial puede volverse objetable, ya que limita la penetración de la luz y aumenta la absorción de calor. Las partículas que causan turbidez también pueden ser un medio de absorción y transporte de bacterias. Las mediciones de turbidez no son necesarias para los efluentes de las minas, pero pueden ser útiles para recibir estudios de impacto de agua.
Alcalinidad	Se define como la cantidad de iones negativos, que reaccionarán para neutralizar los iones de hidrógeno. Es una medida de la capacidad del agua para neutralizar ácidos. Los principales componentes son bicarbonato (HCO_3^{-1}), carbonato (CO_3^{-2}) e iones de hidróxido. La alcalinidad generalmente se expresa en mg/l como CaCO_3 . El agua con muy alta alcalinidad es cáustica y no puede usarse para muchos propósitos
Acidez	Resulta de la disolución del dióxido de carbono o del ácido sulfúrico. El efecto clave será que el pH se reducirá y los metales no deseados se disociarán en la solución. El ajuste de pH es necesario antes de que las aguas residuales se descarguen en un cuerpo receptor.
Cloruros	El cloruro está naturalmente presente en el agua en pequeñas cantidades dependiendo de las formaciones geológicas con las que el agua ha estado en contacto. Sin embargo, se ha informado que los cloruros tienen un efecto adverso en los metales asociados con los sistemas de manejo del agua, mayor concentración se puede acelerar las tasas de corrosión en los sistemas de tuberías.
Sulfatos	Existen de forma natural en el agua que ha entrado en contacto con depósitos minerales como el yeso. El exceso de concentraciones de sulfato tiene un efecto laxante en el consumidor y un sabor desagradable.
Nutrientes (Nitrógeno y Fósforo)	El nitrógeno puede ser orgánico, amoníaco o en otras formas oxidadas como nitritos y nitratos. El fósforo se encuentra en el agua como fosfatos, es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas. Concentraciones excesivas descargadas en aguas receptoras como arroyos y lagos, eventualmente conducirán al crecimiento excesivo de plantas.
Metales no tóxicos	Los metales como Na, K, Ca, Mn, Fe y Mg son esencialmente no tóxicos y se encuentran en concentraciones variables en los residuos líquidos. Los iones de Ca y Mg esencialmente agregan dureza al agua, mientras que los iones Fe y Mn causan decoloración en el agua.
Metales tóxicos	Las concentraciones son generalmente pequeñas, sin embargo, dependiendo del tipo de procesos utilizados, los efluentes pueden contener arsénico, cadmio, cromo, cobre, oro, plomo, mercurio, vanadio y en el caso de la extracción de uranio se presentan otras sustancias radiactivas.
Material particulado (PM)	Es el conjunto de partículas sólidas y/o líquidas presentes en la atmósfera, conformada por metales, sales, materiales carbonatados, orgánicos volátiles, compuestos volátiles (COV), hidrocarburos aromáticos. Este contaminante ocasiona impactos al medio ambiente y el hombre, entre ellos, la disminución visual en la atmósfera por la absorción y dispersión de la luz. Además, su presencia está asociada con el incremento del riesgo de muerte por causas cardiopulmonares.

La caracterización, evaluación y control de estas descargas, tanto en minas activas como fuera de operación son una parte importante de un programa general de control ambiental. El efecto de los metales pesados en el medio ambiente acuático es considerable si las descargas no se controlan.

En este capítulo se presenta un resumen con las normativas ambientales más importantes de algunos países con fuerte presencia en la actividad minera. Se mencionarán las emisiones o descargas permitidas al agua, aire y suelo.

4.1 México

En México la normativa que identifica y define los residuos peligrosos es la norma NOM-052-SEMARNAT-2005. En ésta se especifican las características que definen a un residuo como peligroso, teniendo como características:

- Corrosividad,
- Reactividad,
- Explosividad,
- Toxicidad ambiental,
- Inflamabilidad y
- Biológico-infeccioso.

Estas características corresponden a residuos en cualquier estado físico y por su forma de manejo pueden representar un riesgo para el medio ambiente y la población en general, por tanto, es indispensable determinar los criterios, procedimientos, características y listados para identificarlos.

4.1.1 Agua

La norma que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas es la norma NOM-001ECOL-1996, en esta se define al agua residual como *“el agua de composición variada que proviene de la descarga de usos industriales, municipales, comerciales, de servicios agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo los fraccionamientos y en general de cualquier uso, así como a la mezcla de ellas”*. De lo mencionado por esta norma se remarca que el sector minero está incluido dentro del sector industrial. En la tabla 4.3, se encuentran definidos los límites máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos.

Tabla 4.3: Niveles máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos - México (Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, 1996).

Parámetro	Unidad	Ríos				Aguas costeras (Estuarios)	
		Protección de vida acuática		Uso público urbano		PM	PD
		PM	PD	PM	PD		
Temperatura	°C	40	40	40	40	40	40
pH	-	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10
Sólidos totales en suspensión	mg/l	40	60	75	125	75	125
Sólidos sedimentables	ml/l	1	2	1	2	1	2
Aceites y grasas	mg/l	15	25	15	25	15	25
DBO ₅		30	60	75	150	75	150
Cianuro total (CN)	mg/l	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0
Arsénico total (As)	mg/l	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2
Arsénico trivalente (As ₃)	mg/l	-	-	-	-	-	-
Aluminio (Al)	mg/l	-	-	-	-	-	-
Amonio (N)	mg/l	-	-	-	-	-	-
Antimonio (Sb)	mg/l	-	-	-	-	-	-
Cadmio total (Cd)	mg/l	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2
Cromo (Cr)	mg/l	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Cobalto (Co)	mg/l	-	-	-	-	-	-
Cobre total (Cu)	mg/l	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0
Flúor (F)	mg/l	-	-	-	-	-	-
Hierro disuelto (Fe)	mg/l	-	-	-	-	-	-
Plomo total (Pb)	mg/l	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4
Manganeso (Mn)	mg/l	-	-	-	-	-	-
Mercurio (Hg)	mg/l	0.005	0.01	0.005	0.001	0.01	0.02
Molibdeno (Mo)	mg/l	-	-	-	-	-	-
Níquel (Ni)	mg/l	2	4	2	4	2	4
Nitrógeno total (N)		15	25	40	60	15	25
Fósforo total (P)	mg/l	5	10	20	30	5	10
Selenio (Se)	mg/l	-	-	-	-	-	-
Plata (Ag)	mg/l	-	-	-	-	-	-
Zinc total (Zn)	mg/l	10	20	10	20	10	20

Notas: PM= promedio mensual, es el valor que resulte de calcular el promedio ponderado en función del caudal, de los valores que resulten del análisis de al menos dos muestras compuestas (Promedio diario).

PD=promedio diario, Es el valor que resulta del análisis de una muestra compuesta. En el caso del parámetro grasas y aceites, es el promedio ponderado en función del caudal, de los valores que resulten del análisis de cada una de las muestras simples tomadas para formar la muestra compuesta. Las unidades de pH no deberán estar fuera del rango permisible, en ninguna de las muestras simples.

4.1.2 Aire

Las normativas que regulan la emisión partículas sólidas a la atmósfera son las normas NOM-043-SEMARNAT-1993 y NOM-085-SEMARNAT-2011. En estas se establecen los niveles máximos permisibles por tipo de fuentes de emisión y tipo de combustible empleado durante el proceso de combustión. En la norma NOM-043-SEMARNAT-1993 se establecen los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas (Tabla 4.4) provenientes de fuentes fijas, considera que estas partículas sólidas al combinarse en la atmosfera con otras deterioran la calidad del aire.

Tabla 4.4: Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas - México (Norma Oficial Mexicana NOM-043-SEMARNAT-1993, 1993).

Flujo de gases (m ³ /min)	Zonas críticas ⁽¹⁾ (mg/m ³)	Resto del país (mg/m ³)
5	1536	2304
10	1148	1722
20	858	1287
30	724	1086
40	641	962
50	584	876
60	541	811
80	479	719
100	437	655
200	326	489
500	222	333
800	182	273
1000	166	249
3000	105	157
5000	84	127
8000	69	104
10000	63	95
20000	47	71
30000	40	60
50000	32	48

Nota: ⁽¹⁾ Zonas críticas: Las zonas metropolitanas de la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara, los centros de población de Coatzacoalcos-Minatitlán, Estado de Veracruz; Irapuato-Celaya-Salamanca, Estado de Guanajuato; Tula-Vito-Aspasco, Estado de Hidalgo y de México; Corredor Industrial de Tampico-Madero-Altamira, Estado de Tamaulipas y la zona fronteriza norte.

*La emisión está referida a condiciones normales de temperatura 298 °K (25°C) y presión de 101.325 pascales (760 mm Hg), base seca.

Los datos de flujo de gases no presentados en la Tabla 4.4, presentan dos ecuaciones que permiten interpolar o extrapolar los valores de los niveles máximos permisibles de emisión:

$$\text{Para zonas críticas: } E = 3020/C^{0.42}$$

$$\text{Para el resto del país: } E = 4529.7/C^{0.42}$$

Donde: E corresponde al nivel máximo permisible en miligramos por metro cúbico normal y C al flujo de gases en la fuente en metros cúbicos normales por minuto.

La norma que regula emisión de ruido es Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994, modificada el año 2013. En esta norma se establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de fuentes fijas y su método de medición (Tabla 4.5). Se especifican las zonas de aplicación y horarios.

Tabla 4.5: Límite máximo permisible para la emisión de ruido, en dBA - México (Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994, 2013).

Zona	Horario	Límite máximo permisible dBA
Residencial	6:00 a 22:00	55
	22:00 a 6:00	50
Industrial	6:00 a 22:00	68
	22:00 a 6:00	65

4.1.3 Suelo

En México la regulación de los suelos contaminados por la presencia de la actividad minera se encuentra en las siguientes normas (Tabla 4.6):

Tabla 4.6: Normas mexicanas que regulan el manejo de residuos sólidos - México.

Norma	Descripción
NMX-AA-025-1984	Protección al ambiente- contaminación del suelo -Residuos sólidos - Determinación del pH Método potenciométrico
NOM-141-SEMARNAT-2003	Establece el procedimiento para caracterizar los jales (relaves), así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales (relaves).
NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	Establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio
NOM-155-SEMARNAT-2007	Establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata

En la norma NOM157SEMARNAT2009, se establecen elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros y se menciona las pruebas específicas para caracterizar los residuos y se establecen los límites máximos permisibles en los mismos. Las determinaciones que deberán realizarse dependen de la etapa del proceso minero en la que se genere el residuo, según sea el caso:

- Las concentraciones totales (base seca) de los elementos incluidos como antimonio, arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo, mercurio, plata, plomo y selenio (Tabla 4.7).
- La movilidad de los metales y metaloides presentes en el residuo, conforme a la determinación de las concentraciones totales, con base en los métodos de prueba aplicables (de acuerdo con la granulometría).
- El potencial de generación de drenaje ácido.
- El pH de la disolución del residuo en agua.

Tabla 4.7: Pruebas para determinar la peligrosidad – México(NOM-157-SEMARNAT-2009, 2009).

Etapas del proceso minero	Pruebas para realizar la peligrosidad del residuo
Minado y tratamiento de minerales	Concentración total
	Movilidad
	Potencial de generación de drenaje ácido
Producción de metales mediante procesos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos	Concentración total
	Movilidad
	Potencial de generación del residuo en agua

En la Tabla 4.8, se muestran los límites o niveles máximos permisibles (LMP's) de concentraciones totales. Si se sobrepasan estas concentraciones se tendrá que realizar las pruebas de movilidad y potencial de generación de drenaje ácido o del residuo de agua según sea la etapa del proceso minero.

Tabla 4.8: Niveles máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto líquidos PECT y base seca - México (NOM-157-SEMARNAT-2009, 2009).

Parámetro	LMP (mg/l)	LMP (mg/kg)
	PECT	Base seca
Antimonio (Ab)	0.53	10.6
Arsénico (As)	5.00	100
Bario (Ba)	100.0	2000
Berilio (Be)	1.22	24.4
Cadmio (Cd)	1.00	20
Cromo (Cr)	5.00	100
Mercurio (Hg)	0.20	4
Plata (Ag)	5.00	100
Plomo (Pb)	5.00	100
Selenio (Se)	1.00	20

Notas: PECT, se refiere al procedimiento de extracción de constituyentes tóxicos.
Base seca, se refiere a las concentraciones totales de los metales presentes.

También se define si el residuo es generador potencial de drenaje ácido (Tabla 4.9), En los residuos de los procesos de minado y tratamiento de minerales, el potencial de generación de drenaje ácido se determina aplicando la prueba modificada de balance ácido-base.

Tabla 4.9: Límites para determinar la peligrosidad por el potencial de generación de drenaje ácido - México (NOM-157-SEMARNAT-2009, 2009).

Criterio	Calificación	Peligrosidad
$PN/PA \leq 3$	Generador de drenaje ácido	Peligroso*
$PN/PA > 3$	No generará drenaje ácido	No peligroso

Nota: *Si el valor de la relación PN/PA es mayor de 1 y menor o igual a 3, se considera generador de ácido. En este caso, el generador podrá optar por realizar la prueba estándar de laboratorio sobre intemperización de materiales sólidos utilizando una celda húmeda, para determinar que el residuo no es peligroso.

4.2 Canadá

Este país cuenta con la ley de evaluación ambiental denominada "La Canadian Environmental Assessment Act, 2012". Esta ley publicada en el año 2012 contiene información y obligaciones que son aplicadas a la industria minera y las autoridades a cargo para aplicar y hacer cumplir las normas establecidas, mediante órdenes y multas, además, de promover la participación de la opinión pública. Asimismo, se menciona que la regulación de descargas de residuos mineros esta normada por cada Provincia con presencia minera.

4.2.1 Agua

Los niveles máximos permisibles que limitan la descarga de contaminantes en efluentes líquidos provenientes de las actividades mineras están regulados por cada Provincia que conforman Canadá. Se identificaron cinco provincias (Tabla 4.10).

Tabla 4.10: Normas para emisión de contaminantes en efluentes líquidos por Provincia en Canadá.

Provincia	Año	Norma
Ontario	1994	Ontario Regulation 560/94
Quebec	2004	Directive sur les industries minières (019)
British Columbia	1979	Pollution Control Objectives for the Mining, Smelting and Related Industries of British Columbia.
Saskatchewan	1996	Mineral Industry Environmental Protection Regulations
Newfoundland	2003	Environmental Control Water and Sewage Regulations

Se consideran los niveles máximos permisibles correspondiente a la provincia de British Columbia (Tabla 4.11), mencionando que esta cuenta con mayor cantidad de parámetros de medición. En esta norma se presentan parámetros tales como sólidos, aceites, grasas, metales pesados, potencial de hidrogeno pH, entre otros compuestos.

Tabla 4.11: Niveles máximos permisibles para descarga final a agua marinas y dulces en British Columbia - Canadá (Ministry of Environment Victoria, 1979).

Parámetro	Unidad	Rango	
pH	-	6.5-8.5	6.5-10
Sólidos totales en suspensión ⁽¹⁾⁽²⁾	mg/l	25	75
Sólidos totales disueltos	mg/l	2500	5000
Toxicidad ⁽³⁾	%	100-80	80
Radiactividad ⁽⁶⁾			
Gross Alpha	-	10	100
Gross beta	-	<10	<10
Aceites y grasas	mg/l	10	15
Cianuro total (CN)	mg/l	0.1	0.5
Arsénico total (As)	mg/l	0.10	1
Arsénico trivalente (As ³)	mg/l	0.05	0.25
Aluminio (Al)	mg/l	0.5	1
Amonio (N)	mg/l	1	10
Antimonio (Sb)	mg/l	0.25	1
Cadmio total (Cd)	mg/l	0.01	0.1
Cromo (Cr)	mg/l	0.05	0.3
Cobalto (Co)	mg/l	0.5	1.0
Cobre total (Cu)	mg/l	0.05	0.3
Flúor (F)	mg/l	2.5	10
Hierro (Fe)	mg/l	0.3	1
Plomo total (Pb)	mg/l	0.05	0.2
Manganeso (Mn)	mg/l	0.1	1.0
Mercurio total (Hg)	mg/l	-	0.005
Molibdeno (Mo)	mg/l	0.5	5
Níquel (Ni)	mg/l	0.2	1.0
Nitrato (N)	mg/l	10.0	25.0
Fosfato (P)	mg/l	2.0	10.0
Selenio (Se)	mg/l	0.05	0.5
Plata (Ag)	mg/l	0.05	0.5
Dióxido de uranio (UO ₂)	mg/l	2.0	5.0
Zinc total (Zn)	mg/l	0.2	1.0

Nota: (1) No aplicable a la descarga directa aprobada de sólidos de relaves.

- (2) Se pueden permitir variaciones durante los períodos de exceso de escorrentía.
- (3) Bioensayo sobre especies de salmónidos.
- (4) Se evaluará la concentración de fondo natural.
- (5) El análisis de los elementos totales en relaves puede requerirse antes y durante las operaciones.
- (6) Aplicar a operaciones donde el objetivo no es la extracción de minerales radiactivos.

4.2.2 Aire

La emisión de contaminantes en Canadá está regulada por cada provincia, cada una de estas presenta niveles máximos permisibles de emisión. En la Tabla 4.12, se presenta los niveles máximos permisibles de la Provincia de British Columbia.

Tabla 4.12: Niveles máximos permisibles para descarga final al aire en British Columbia - Canadá (Ministry of Environment Victoria, 1979).

Parámetro	Unidad	Rango	
Dióxido de sulfuro:	-	-	-
Media aritmética anual	µg/m ³	25	75
Concentración a 24 horas	µg/m ³	160	260
Concentración a 3 horas	µg/m ³	375	665
Concentración a 1 hora	µg/m ³	450	900
Partículas suspendidas	-	-	-
Media geométrica anual	µg/m ³	60	70
Concentración a 24 horas	µg/m ³	150	200
Derivado de radón	-	-	-
Concentración	WL	<0.02	<0.02
Asbestos	Fibras/cm ³	<0.04	<0.04
Polvo	mg/dm ² .d	1.7	2.9
Arsénico (As)	µg/m ³	0.10	1
Antimonio (Sb)	µg/m ³	0.1	0.5
Cadmio (Cd)	µg/m ³	0.01	0.1
Cromo (Cr)	µg/m ³	0.05	0.1
Cobre (Cu)	µg/m ³	0.25	2.5
Flúor (F)	µg/m ³	0.1	2.0
Plomo (Pb)	µg/m ³	1.0	2.5
Mercurio (Hg)	µg/m ³	0.1	1.0
Molibdeno (Mo)	µg/m ³	0.1	2.5
Níquel (Ni)	µg/m ³	0.01	0.1
Selenio (Se)	µg/m ³	0.1	0.5
Uranio(U)	µg/m ³	0.01	6.0
Vanadio (V)	µg/m ³	0.05	1.0
Zinc (Zn)	µg/m ³	1.0	2.5

4.2.3 Suelo

En la Provincia de British Columbia en Canadá se estableció en 1979, que los residuos industriales, incluidos los desechos de plantas, los sólidos transportados por el aire en emisiones gaseosas y la roca de desecho, normalmente asociados a la operación minera, se consideran vertidos al suelo, siendo los siguientes objetivos de aplicación general:

1. La elección del sitio y el método de eliminación deben minimizar la posible molestia por incendios y contaminación por lixiviados.

2. La frecuencia de colocación debe especificarse en cada sitio.
3. La incineración abierta normalmente está prohibida, sin embargo, se puede permitir la incineración controlada en un lugar específico.
4. El método de eliminación de residuos peligrosos en cada sitio será designado por la entidad reguladora.

4.3 Estados Unidos

La Agencia de Protección del Medio Ambiente (USEPA), es la agencia federal de los Estados Unidos, responsable de administrar e implementar y hacer cumplir las leyes ambientales. La principal ley del estado que controla y regula la contaminación de las aguas, ha desarrollado los estándares nacionales para la calidad del agua y los límites de descarga de aguas residuales a aguas navegables.

4.3.1 Agua

Para la descarga de contaminantes a un cuerpo de agua es necesario obtener un permiso emitido por el sector estatal. En este se especifica la cantidad y concentración de contaminantes en la descarga del efluente, asegurando que el cuerpo receptor presente una calidad adecuada para su utilización y que se encuentra conforme con los estándares de calidad nacionales.

En la sección 402 de la Ley de Agua Limpia, se establece que el sistema para los permisos de descarga de agentes contaminantes en las aguas de los Estados Unidos, es el Sistema Nacional para Eliminación de Descarga de Contaminantes (NPDES) que regula las fuentes de descarga puntuales. El código federal de regulaciones CFR publicado el año 2003, establece en el título 40 parte 440, los límites máximos permisibles (Tabla 4.13) para la descarga de efluentes líquidos a los cuerpos de agua.

Tabla 4.13: Niveles máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos - Estados Unidos (CFR Title 40 Part 440, 2003).

Parámetro	Unidad	Promedio de valores diarios durante 30 días consecutivos	Máximo por 1 día
pH	-	6 - 9	6 - 9
Sólidos totales en suspensión	mg/l	20	30
Aceites y grasas	mg/l	-	-
Demanda química de oxígeno	mg/l	100	500
Cianuro total (CN)	mg/l	-	-
Arsénico total (As)	mg/l	0.5	1.0
Arsénico trivalente (As ₃)	mg/l	-	-
Aluminio (Al)	mg/l	1.0	2.0
Amonio (N)	mg/l	-	-
Antimonio (Sb)	mg/l	-	-
Cadmio total (Cd)	mg/l	0.05	0.1
Cromo hexavalente* (Cr)	mg/l	-	-
Cobalto (Co)	mg/l	-	-
Cobre total (Cu)	mg/l	0.15	0.3
Flúor (F)	mg/l	-	-
Hierro total (Fe)	mg/l	0.5	1.0
Plomo total (Pb)	mg/l	0.3	0.6
Manganeso (Mn)	mg/l	-	-
Mercurio total (Hg)	mg/l	0.001	0.002
Molibdeno (Mo)	mg/l	-	-
Niquel (Ni)	mg/l	0.1	0.2
Nitrato (N)	mg/l	-	-
Fosfato (P)	mg/l	-	-
Selenio (Se)	mg/l	-	-
Plata (Ag)	mg/l	-	-
Zinc total (Zn)	mg/l	0.5	1.0

4.3.2 Aire

La USEPA se ocupa principalmente de las emisiones de las actividades mineras o industriales que son o podrían ser perjudiciales a la población. Los compuestos identificados como contaminantes son el monóxido de carbono (CO), el plomo (Pb), el dióxido de nitrógeno (NO₂), el ozono (O₃), material particulado (PM) y el dióxido de azufre (SO₂). El código federal 40 CFR parte 50 es la ley que regula la calidad del aire, en él se encuentra los estándares nacionales de calidad del aire ambiental para los contaminantes considerados dañinos para la salud pública y el medio ambiente. Esta ley fue modificada por última vez en 1990, y se identifican en dos tipos de normas nacionales de calidad del aire:

- Las normas primarias brindan protección de salud pública, incluida la protección de la salud de poblaciones sensibles como los niños y los ancianos.
- Las normas secundarias brindan protección al bienestar público, incluida la protección contra la disminución de la visibilidad y el daño a los animales, cultivos, vegetación y edificaciones.

La USEPA ha establecido estándares nacionales de calidad del aire ambiental (Tabla 4.14) para seis contaminantes principales, denominados contaminantes atmosféricos.

Tabla 4.14: Niveles máximos permisibles de calidad de aire - Estados Unidos (CFR Title 40 Part 440, 2003).

Parámetro	Primaria/ secundaria	Tiempo promedio	Concentración media aritmética $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ppm)	Forma	
Monóxido de carbono (CO)	primaria	8 horas	(9)	No debe excederse más de una vez al año	
		1 hora	(35)		
Plomo (Pb)	primaria y secundaria	Continuo cada 3 meses en promedio	0.15	No debe ser excedido	
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	primaria	1 hora	100 ppb	Percentil 98 de las concentraciones máximas diarias de 1 hora, promediados durante 3 años	
	primaria y secundaria	1 año	53 ppb	Promedio anual	
Ozono (O ₃)	primaria y secundaria	8 horas	0.070 ppb	Concentración diaria máxima de 8 horas, la cuarta más alta, promediada durante 3 años	
Contaminante particulado (PM)	PM _{2.5}	primaria	1 año	12	promedio anual, promediada en 3 años
		secundaria	1 año	15	promedio anual, promediada en 3 años
		primaria y secundaria	24 horas	35	Percentil 98, promediado durante 3 años
	PM ₁₀	primaria y secundaria	24 horas	150	No debe excederse más de una vez al año en promedio durante 3 años
Dióxido de azufre (SO ₂)	primaria	1 hora	75 ppb	Percentil 99 de concentraciones máximas diarias de 1 hora, promediadas durante 3 años	
	secundaria	3 horas	0.5 ppm	No debe excederse más de una vez al año	

4.3.3 Suelo

La descarga de suelo con contaminantes se considera peligroso si cumplen con una de las descripciones del listado que se encuentran en las reglamentaciones y no cumplen con ninguna de las exclusiones descritas en la norma 40 CFR 261.4. USEPA identificó propiedades o características específicas que causarían que un residuo sólido representara una amenaza para la salud humana y el medio ambiente. Los residuos considerados como peligrosos presentan una o más de las siguientes propiedades:

- Inflamabilidad, que puede incendiarse y sostener la combustión.
- Corrosividad, que corroe metales o tiene un pH alto o bajo.
- Reactividad, que explota fácilmente o sufre reacciones violentas.
- Toxicidad, categoría de desechos de 40 componentes que se sabe que son dañinos o fatales cuando se ingieren y que se filtran en el agua subterránea a ciertos niveles (por ejemplo: arsénico, plomo y mercurio).

Las definiciones para estas características se encuentran en 40 CFR 261.21 a 261.24. Aquellos residuos que cumplen con una o más de estas descripciones y que no están específicamente excluidos según 40 CFR 261.4, serán considerados peligrosos.

4.4 Perú

Las normas que regulan las emisiones o descargas de contaminantes a cuerpos receptores están a cargo del Ministerio del Ambiente (MINAM), que tiene como objetivos asegurar y garantizar el uso sostenible y preservar los recursos naturales, además de la calidad ambiental.

4.4.1 Agua

En Perú, el reglamento de la ley de recursos hídricos N° 29338, establece que las descargas de residuos líquidos provenientes de las actividades mineras deben estar especificadas en el estudio de impacto ambiental y está referido a la actividad de evaluación del sistema de tratamiento de agua en el cuerpo receptor. La ANA (Autoridad nacional del Agua) es la que autoriza el vertimiento de aguas residuales cuando:

- Las aguas residuales sean sometidas a un tratamiento previo, que permitan el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles (LMP's).
- No se transgredan los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ECA -Agua) en el cuerpo receptor, según las disposiciones que dicte el Ministerio del Ambiente para su implementación.
- Las condiciones del cuerpo receptor permitan los procesos naturales de purificación;
- No se cause perjuicio a otro uso en cantidad o calidad del agua.
- No se afecte la conservación del ambiente acuático.
- Se cuente con el instrumento ambiental aprobado por la autoridad ambiental sectorial competente.
- Su lanzamiento submarino o subacuático, con tratamiento previo, no cause perjuicio al ecosistema y otras actividades lacustre, fluviales o marino costeras, según corresponda.

El vertimiento o descarga de agua residual deberá contar con la autorización de la ANA previa opinión técnica de la autoridad ambiental correspondiente y de Salud sobre el cumplimiento de los LMP's (Límites máximos permisibles) y ECA (Estándar de calidad del agua), respectivamente.

La descarga de efluentes líquidos provenientes de las actividades mineras está regulada por los límites máximos permisibles y establecidos por decreto supremo N° 010-2010 – MINAM (Tabla 4.15).

Tabla 4.15: Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgica, en mg/l - Perú (Decreto supremo N° 10-2010-MINAM, 2010).

Parámetro	Límite en cualquier momento ⁽¹⁾	Límite para el promedio anual ⁽²⁾
pH	6 - 9	6 - 9
Sólidos totales en suspensión	50	25
Aceites y grasas	20	16
Cianuro total	1	0.8
Arsénico total	0.1	0.08
Cadmio total	0.05	0.04
Cromo hexavalente*	0.1	0.08
Cobre total	0.50	0.4
Hierro (disuelto)	2	1.6
Plomo total	0.2	0.16
Mercurio total	0.002	0.0016
Zinc total	1.5	1.2

Notas: ⁽¹⁾ Valor del parámetro que no debe ser excedido en ningún momento.

⁽²⁾ Valor del parámetro que no debe ser excedido por el promedio aritmético de todos los resultados de los monitoreos realizados durante los últimos doce meses previos a la fecha de referencia.

* En muestra no filtrada.

4.4.2 Aire

La emisión de gases está regulada por la resolución ministerial N° 315-96-EM/VMM emitida el año 1996. Se establecen los niveles máximos permisibles para emisiones gaseosas en el área de influencia de las operaciones mineras, siendo estos medibles en la fuente y son aplicables únicamente a fuentes puntuales. Los niveles de emisión para material particulado, plomo y arsénico son valores constantes (Tabla 4.16) además, los niveles de emisión de dióxido de azufre están dados en función del azufre total que ingresa al proceso (Tabla 4.17). En el artículo 6 de la resolución ministerial N° 315-96-EM/VMM estipulan que las concentraciones de gases y partículas que están presentes en el área de influencia de la unida minera-metalúrgica no excedan los estándares nacionales de calidad ambiental para aire.

Tabla 4.16: Niveles máximos permisibles para emisiones gaseosas - Perú (Resolución ministerial N° 315-96EM/VMM, 1996).

Parámetro	Valor en cualquier momento (mg/m ³)
Material particulado (MP ₁₀)	100
Plomo	25
Arsénico	25

Notas: mg/m³: miligramos por metro cúbico en condiciones normales o estándar.

Tabla 4.17: Emisiones máximas permisibles para emisiones de dióxido de azufre - Perú (Resolución ministerial N° 315-96EM/VMM, 1996).

Azufre que ingresa al proceso (t/d)	Valor en cualquier momento (t/d)	Azufre que ingresa al proceso (t/d)	Valor en cualquier momento (t/d)
<10	20	181 - 210	108
11 - 15	25	211 - 240	117
6 - 20	30	241 - 270	126
21 - 30	40	271 - 300	135
31 - 40	50	301 - 400	155
41 - 50	60	401 - 500	175
51 - 70	66	501 - 600	195
71 - 90	72	601 - 900	201
91 - 120	81	901 - 1200	207
121 - 150	90	1201 - 1500	213
151 - 180	99	>1500	0.142(S)*

Nota: *(S)=Azufre total ingresado al proceso.

En la resolución ministerial RM 315-96-EM/VMM, se tiene los niveles máximos permisibles especificados en los estándares de calidad de aire (Tabla 4.18).

Tabla 4.18: Niveles máximos permisibles de calidad de aire - Perú (Resolución ministerial N° 315-96EM/VMM, 1996).

Parámetro	Concentración media aritmética diaria ⁽¹⁾ µg/m ³ (ppm)	Concentración media aritmética anual ⁽²⁾ µg/m ³ (ppm)	Concentración media geométrica anual ⁽³⁾ µg/m ³ (ppm)
Dióxido de carbono (CO ₂)	572 (0.2) *	172 (0.06)	-
Partículas en suspensión MP ₁₀	350*	-	150
Plomo (Pb)	-	0.5	-
Arsénico (As)	8	-	-

Notas: ⁽¹⁾ Es la concentración obtenida al dividir la suma de las concentraciones medidas durante 24 horas entre el número de mediciones efectuadas. Para este efecto las muestras se tomarán en 16 horas como mínimo.

⁽²⁾ Es la concentración obtenida al dividir la suma de los valores calculados para la concentración media aritmética diaria entre el número de días en que definitivamente se realizaron estas mediciones. Para tal efecto se tendrá en consideración la duración del año calendario.

⁽³⁾ Es la concentración obtenida de extraer la raíz enésima (n es el número de valores calculados para la concentración media aritmética diaria) del producto de las concentraciones medias aritméticas.

*No debe ser excedido más de una vez al año.

Además, se debe tener en cuenta:

- Concentración mensual de plomo: 1.5 µg/m³.
- Concentración mensual de arsénico en 30 minutos: 30.0 µg/m³ (no debe ser excedido más de una vez al año).

Las emisiones de ruido debido a las actividades mineras están reguladas por los estándares de calidad ambiental para ruido en el decreto supremo N° 085-2003-PCM (Tabla 4.19). En este documento se establecen los niveles máximos permisibles de ruido en el ambiente que no deben excederse para proteger la salud humana. Además, se especifican las zonas y horarios de aplicación.

Tabla 4.19: Estándares nacional de calidad ambiental para ruido, en dBA - Perú (Decreto supremo N°085-2003PCM, 2003).

Zona de aplicación	Horario diurno (De 7:01 a 22:00 horas)	Horario nocturno (De 22:01 a 7:00 horas)
Zona de protección	50	40
Zona residencial	60	50
Zona comercial	70	60
Zona industrial	80	70

4.4.3 Suelo

Perú a la fecha de la realización de la presente investigación no tiene una norma de emisión de descarga de residuos sólidos, cuenta con guías para el manejo y disposición de residuos provenientes de la actividad minera.

4.5 Chile

En Chile existen distintos tipos de normas ambientales: las normas primarias de calidad ambiental, las normas secundarias de calidad ambiental y las normas de emisión.

- Las normas de calidad primarias están orientadas a proteger la salud de la población y se aplican por igual en todo el país. Establecen la cantidad máxima de sustancias contaminantes cuya presencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o salud de la población. También indican cómo se medirá y cuándo se considera que la norma ha sido sobrepasada. Estas normas constituyen una referencia para planes de prevención y descontaminación.
- Las normas de calidad secundarias permiten proteger recursos naturales u otros, tales como cultivos, ecosistemas, especies de flora o fauna, monumentos nacionales o sitios con valor arqueológico. Establecen las cantidades máximas de sustancia cuya presencia en el ambiente puede constituir un riesgo para la protección o conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza. Su aplicación puede ser a nivel nacional o local dependiendo del recurso que se está protegiendo.

Referente al manejo de residuos peligrosos Chile cuenta con el decreto supremo N° 148 Reglamento Sanitario, en este decreto considera que los residuos mineros masivos que presenten como origen las operaciones de extracción, beneficio o procesamiento de minerales. No consideran peligrosos los siguientes residuos: los estériles, los minerales de baja ley, los residuos minerales obtenidos por lixiviación, los relaves y las escorias. Sin embargo, la mayoría de los componentes tóxicos que contienen los relaves si están dentro de la lista de residuos peligrosos.

4.5.1 Agua

En Chile el decreto supremo N° 90/2000 “Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales”, con año de publicación 2001, establecen los niveles máximos permisibles (Tabla 4.20) para el sector industrial en el cual se incluyen las actividades relacionadas a la actividad minera.

Tabla 4.20: Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgica - Chile (Decreto supremo N° 90, 2001).

Parámetro	Unidad	Límites máximos permisibles en cuerpos receptores				
		Fluviales		Lacustre	Marinos dentro de zona de protección litoral	Marinos fuera de zona de protección litoral
		Sin dilución	Con dilución			
Aceites y grasas	mg/l	20	50	20	20	350-150 ⁸
Aluminio	mg/l	5	10	1	1	10
Arsénico	mg/l	0.5	1	0.1	0.2	0.5
Boro	mg/l	0.75	3	-	-	-
Cadmio	mg/l	0.01	0.3	0.02	0.02	0.5
Cianuro	mg/l	0.2	1	0.5	0.5	1
Cloruros	mg/l	400	2000	-	-	-
Cobre total	mg/l	1	3	0.1	-	3
Coliformes fecales	NMP/100ml	1000	1000	1000-70 ⁵	1000-70 ⁶	-
Índice de fenol	mg/l	0.5	1	0.5	0.5	1
Cromo hexavalente	mg/l	0.05	0.2	0.2	0.2	0.5
Cromo total	mg/l	-	-	2.5	2.5	10
DBO ₅ ¹	mg O ₂ /l	35 ⁴	300	35	60	-
Estaño	mg/l	-	-	0.5	0.5	1
Fósforo	mg/l	10	15	2	5	-
Fluoruro	mg/l	1.5	5	1	1.5	6
Hidrocarburos fijos	mg/l	10	50	-	-	-
Hidrocarburos totales	mg/l	-	-	5	10	20
Hidrocarburos volátiles	mg/l	-	-	-	1	2
Hierro disuelto	mg/l	5	10	2	10	-
Manganeso	mg/l	0.3	3	0.5	2	4
Mercurio	mg/l	0.001	0.01	0.005	0.005	0.02
Molibdeno	mg/l	1	2.5	0.07	0.1	0.5
Níquel	mg/l	0.2	3	0.5	2	4
Nitrógeno total kjeldahl ²	mg/l	50	75	-	-	-
Nitrógeno total ⁶	mg/l	-	-	10	50	-
Pentaclorofenol	mg/l	0.009	0.01	-	-	-
pH	-	6.0-8.5	6.0-8.5	6.0-8.5	6.0-9.0	5.5-9.0
Plomo	mg/l	0.05	0.5	0.2	0.2	1
Poder espumógeno	mm	7	7	-	-	-
SAAM ³	mg/l	-	-	10	10	15
Selenio	mg/l	0.01	0.1	0.01	0.01	0.03
Sólidos sedimentables	ml/l/h	-	-	5	5	50-20 ⁸
Sólidos suspendidos totales	mg/l	80 ⁴	300	80	100	700-300 ⁸
Sulfatos	mg/l	1000	2000	1000	-	-
Sulfuros	mg/l	1	10	1	1	5
Temperatura	C°	35	40	30	30	-
Tetracloroetano	mg/l	0.04	0.4	-	-	-
Tolueno	mg/l	0.7	7	-	-	-
Triclorometano	mg/l	0.2	0.5	-	-	-
Xileno	mg/l	0.5	5	-	-	-
Zinc	mg/l	3	20	5	5	5

Notas: ¹ Demanda bioquímica de oxígeno.

² Mediante el método Kjeldahl (se basa en una volumetría ácido-base y se emplea el aparato de destilación Kjeldahl).

³ Sustancias activas al azul de metileno.

⁴ Para residuos líquidos provenientes de aguas servidas domésticas.

⁵ En áreas aptas para la agricultura y áreas de manejo y explotación de recursos bentoníticos, no se debe sobrepasar los 70 NMP/100 ml.

⁶ Corresponde a la suma de las concentraciones de nitrógeno total kjeldahl, nitrito y nitrato.

En la Tabla 4.20, se observa el incremento de las concentraciones límites máximas permisibles establecidas para los cuerpos de aguas fluviales y lacustres cuando se considera la capacidad de dilución del cuerpo receptor, no siendo aplicable para los cuerpos de agua marinos dentro y fuera de la zona de protección litoral. El número mínimo de días del muestreo en el año calendario se determinará conforme se indica en la Tabla 4.21:

Tabla 4.21: Frecuencia de monitoreo del agua - Chile (Decreto supremo N° 90, 2001).

Volumen de descarga m ³ x 10 ³ /año	Número de días de monitoreo anual, N
< 5.000	12
5.000 a 20.000	24
>20.000	48

Para aquellas fuentes emisoras que neutralizan sus residuos líquidos, se requerirá medición continua con pH-metro y registrador. El número mínimo de días de toma de muestras anual debe distribuirse mensualmente, determinándose el número de días de toma de muestra por mes en forma proporcional a la distribución del volumen de descarga de residuos líquidos en el año.

4.5.2 Aire

Los residuos generan gran cantidad de polución por efecto de la erosión por viento, estos se concentran casi en su totalidad en las zonas más desérticas del norte de Chile, produciéndose corrientes de viento que pueden trasladarse fácilmente desde la alta montaña hasta el mar, debido a la ausencia de vegetación. Por tanto, se tienen estándares que regulan la calidad del aire como son los decretos Decreto Supremo N° 12/11 MMA y el Decreto Supremo N° 20/13 MMA publicadas los años 2011 y 2013 respectivamente. Estos decretos regulan la cantidad de material particulado generado por la industria destacando el sector minero como principal emisor. En las Tablas 4.22 y 4.23, se muestran las concentraciones medidas en 24 horas y los niveles que originan las situaciones de emergencia ambiental.

Tabla 4.22: Estándares nacional de calidad ambiental para material particulado respirable MP10- Chile (Decreto supremo N° 12/11 MMA, 2013, Decreto supremo N° 20/13 MMA, 2013).

Índice de calidad del aire ICAP	Concentración de 24 horas ⁽³⁾ (µg/m ³)	
	MP10 ⁽¹⁾	MP2.5 ⁽²⁾
0	0	0
100	150	50
500	330	170

Notas: ⁽¹⁾ Partículas de diámetro menor o igual a 10 micrones.

⁽²⁾ Partículas de diámetro menor o igual a 2.5 micrones.

⁽³⁾ Corresponde al promedio de los valores efectivamente medidos de concentración en la estación monitorea en 24 horas consecutivas.

Los valores intermedios se interpolarán linealmente. Solamente para efectos de evaluar esta función, se usará el valor de MP2.5 o MP10 como igual a cero (0) µg/m³ cuando el ICAP es igual a cero (0).

Tabla 4.23: Niveles que originan situaciones de emergencia ambiental para material particulado respirable MP10 y MP2.5 - Chile (Decreto supremo N° 12/11 MMA, 2013; 20/13 MMA, 2013).

Nivel	Concentración 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	MP10	MP2.5
1. Alerta	195 - 239	80-109
2. Preemergencia	240 - 329	110-169
3. Emergencia	330 o superior	170 o superior

Notas: Las concentraciones serán obtenidas a partir de un pronóstico de calidad del aire, o bien, en caso que no se cuente con este pronóstico, de la constatación de las concentraciones de Material Particulado Respirable a partir de las mediciones provenientes de alguna de las estaciones de monitoreo de calidad del aire calificadas (EMRP).

El Decreto Supremo N°38/11 emitido por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile, tiene por objeto proteger la salud de la comunidad mediante el establecimiento de niveles máximos de emisión de ruido generados por las fuentes emisoras de ruido. Los límites señalados por la normativa (Tabla 4.24), deben ser fijados a partir de los usos de suelo permitidos en los instrumentos de planificación territorial vigentes del lugar donde se ubique el receptor y son más estrictos en el periodo nocturno, en aquellas zonas donde residan personas.

Tabla 4.24: Niveles máximos permisibles de presión sonora corregidos, en dBA - Chile (Decreto supremo N°38/11 MMA, 2011).

Lugar	De 7 a 21 horas	De 21 a 7 horas
Zona I	55	45
Zona II	60	45
Zona III	65	50
Zona IV	70	70

Notas: Zona I, definida y ubicada dentro del límite urbano, que permite exclusivamente uso de suelo residencial o bien este uso de suelo y alguno de los siguientes usos de suelo: espacio público y/o área verde.

Zona II, definida y ubicada dentro del límite urbano, que permite además de los usos de suelo de la Zona I, Equipamiento de cualquier escala.

Zona III, definida y ubicada dentro del límite urbano, que permite además de los usos de suelo de la Zona II, actividades productivas y/o de Infraestructura.

Zona IV, definida y ubicada dentro del límite urbano, que permite sólo usos de suelo de actividades productivas y/o de infraestructura.

Para zonas rurales (ubicada al exterior del límite urbano) se aplicará como nivel máximo permisible de presión sonora corregido (NPC, nivel de presión sonora continuo equivalente establecida en el Decreto Supremo N°38/11), el menor valor entre:

1. Nivel de ruido de fondo + 10 dBA.
2. NPC para Zona III de la Tabla 4.24.

4.5.3 Suelo

Chile no cuenta aún con una norma o reglamento que regule la descarga, protección y calidad de uso de suelos.

4.6 Unión europea

Las directivas o normativas ambientales emitidas por la Unión Europea pretenden establecer la necesidad de reducir los niveles de contaminación que limiten al mínimo los efectos perjudiciales para la salud humana, prestando especial atención a las poblaciones más vulnerables y al medio ambiente en su conjunto, de mejorar el control y la evaluación de la calidad del aire ambiente, incluido el depósito de contaminantes, y de proporcionar información a los ciudadanos.

4.6.1 Agua

La Directiva 2010/75/UE del parlamento europeo y del consejo emitido el año 2010, se refiere a las emisiones industriales, recomienda cumplir con los valores máximos permisibles para la emisión de agua proveniente de las actividades industriales en el cual se considera a la minería:

- a) El total de sólidos en suspensión, cuando el 95% y el 100% de los valores medidos no superan los respectivos valores límite de emisiones establecidas en la tabla 4.25.
- b) Los metales pesados (Hg, Cd, Tl, As, Pb, Cr, Cu, Ni y Zn), cuando no más de una medición al año supera los valores límite de emisión establecidos; o bien, si el Estado miembro establece la toma de más de 20 muestras al año, no más del 5% de esas muestras supera los valores límite de emisión establecidos en la tabla 4.25.

Tabla 4.25: Límites máximos permisibles para vertidos de agua provenientes de actividades industriales - Unión Europea (Directiva 2010/75/UE, 2010).

Parámetro	LMP ⁽¹⁾ (mg/m ³)
Sólidos en suspensión	45
Mercurio	0.03
Cadmio	0.05
Talio	0.05
Arsénico	0.15
Plomo	0.2
Cromo	0.5
Cobre	0.5
Níquel	0.5
Zinc	1.5

Notas: ⁽¹⁾Para muestras no filtradas.

4.6.2 Aire

La directiva 2008/50/CE emitida en el año 2008 menciona que la evaluación de la calidad del aire ambiente debe efectuarse con un enfoque común basado en criterios de evaluación comunes. Esta evaluación debe tener en cuenta el tamaño de las poblaciones y los ecosistemas expuestos a la contaminación atmosférica. Procede por lo tanto clasificar el territorio de los Estados miembros por zonas o aglomeraciones que reflejen la densidad de población. Además, se establecen directivas para la mejora de

la calidad del aire en la Unión Europea. Como son los objetivos para reducción de contaminantes a mediano y largo plazo (Tablas 4.26 y 4.27).

Tabla 4.26: Estándares de calidad de aire - Unión Europea (Directiva 2008/50/CE, 2008).

Parámetro		Periodo de medición	LMP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Forma
Dióxido de azufre (SO_2)	Valor límite horario	1 hora	350	No debe excederse en más de 24 veces al año.
	Valor límite diario	24 horas	125	No debe excederse en más de 3 veces al año
	Nivel crítico anual	1 año	20	-
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	Valor límite horario	1 hora	200	No debe excederse en más de 18 veces al año.
	Valor límite diario	1 año	40	-
	Nivel crítico anual	1 año	30	-
Ozono (O_3)	Diaria ⁽¹⁾	8 horas	120	No debe excederse en más de 25 veces al año.
Plomo (Pb)	Valor límite anual	1 año	0.5	-
Monóxido de carbono (CO)	Diaria ¹	8 horas	0.010	-
Arsénico (As) ⁽²⁾	-	-	0.006	-
Cadmio ²	-	-	0.005	-
Níquel ²	-	-	0.020	-

Notas: Los valores de volumen deben ser referido a una temperatura de 293 K y a una presión de 101.3 kPa.

⁽¹⁾Se atribuirá al día en que termine el período, es decir, el primer período de cálculo para cualquier día dado será el período que comience a las 17:00 de la víspera y termine a la 1:00 de ese día; el último período de cálculo para cualquier día dado será el que transcurra entre las 16:00 y las 24:00 de ese día.

⁽²⁾Niveles en aire ambiente en la fracción PM10 como promedio durante un año.

Tabla 4.27: Estándares de calidad para material particulado respirable PM10 y PM2.5 - Unión Europea (Directiva 2008/50/CE, 2008).

Parámetro	LMP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Forma
MP10	Valor límite diario	50	No debe excederse en más de 35 veces al año
	Valor límite anual	40	-
MP2.5 ⁽¹⁾	Valor límite diario	25	-
	Valor límite anual	20	-

Notas: Los valores de volumen deben ser referido a una temperatura de 293 K y a una presión de 101.3 kPa.

⁽¹⁾El margen de tolerancia es de 20% el 11 de junio de 2008, que se reducirá el 1 de enero siguiente y, en lo sucesivo, cada 12 meses, en porcentajes idénticos anuales hasta alcanzar un 0% el 1 de enero de 2015, estableciéndose los siguientes valores: 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2008; 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2009 y 2010; 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2011; 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2012; 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2013 y 2014.

4.7 Sudáfrica

4.7.1 Agua

Este país cuenta con guías para el manejo de aguas en la industria minera, éstas fueron publicadas en el año 2007 por el departamento de recursos forestales y agua (DWFA). Dado que el sector minero no goza de un derecho de uso del agua. La Estrategia Nacional de Recursos Hídricos (NWRs) establece las formas en que DWAF pretende lograr la gestión integrada de los recursos hídricos en Sudáfrica. Describe las políticas, estrategias, planes y procedimientos por los cuales se hará esto.

4.7.2 Aire

Los estándares de emisión al aire en Sudáfrica están regulados en la norma National Environmental Management: Air Quality Act, 2004 (Act no. 39 of 2004). En esta se establece los límites máximos permisibles de descarga (Tabla 4.28) según el tipo de industria o actividades relacionadas a la actividad minera.

Tabla 4.28: Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes al aire de las actividades minero-metalúrgica, en mg/Nm³ - Sudáfrica (Air Quality Act, 2004 - Act no. 39, 2004).

Parámetro	LMP
Materia particulado	10
Dióxido de sulfuro (SO ₂)	100
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	300
Componentes orgánicos volátiles (VOCs)	40
Amoniaco (NH ₃)	10
Plomo (Pb)	2
Mercurio (Hg)	0.2
Cloro (Cl ₂)	50
Cloruro de hidrogeno (HCl)	10
Fluoruro de hidrogeno (HF)	1
Vanadio (V)	1x10 ⁻⁶
Cadmio y talio (Cd y Tl)	0.05

Notas: La concentración o masa de contaminante para la cual se han establecido estándares de emisiones, como el promedio de al menos dos mediciones, cada una medida sobre un período mínimo de muestreo de 60 minutos y un máximo de 8 horas para obtener una muestra representativa.

4.7.3 Suelo

Sudáfrica no cuenta con una norma o reglamento que regule la descarga de suelos procedentes de la actividad minera.

4.8 Australia

4.8.1 Agua

Australia no tiene estándares nacionales de emisiones al agua, cada estado determina los requerimientos que considera necesario para mantener la calidad de sus aguas. Estos establecen los límites de emisión de contaminantes a cuerpos de agua a través del otorgamiento de licencias que especifican la cantidad y concentración máxima de contaminantes en la descarga de residuos líquidos. Estas regulaciones son administradas y controladas por la Autoridad de Protección Ambiental de la jurisdicción respectiva. Este país cuenta con guías ambientales relacionadas con el control de la contaminación de las aguas, como la Guía para la Calidad de Aguas Dulces y Marinas en Australia y Nueva Zelanda (Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality Guidelines) implementada en el año 2000. Sin embargo, no es obligatoria en cada estado que ha desarrollado su propio marco legal, el que debe ser compatible y consistente con estas guías a nivel nacional. En la Tabla 4.29, se tienen los parámetros estándar de calidad de agua dulce y marinas de Australia.

Tabla 4.29: Estándar de calidad de agua dulce y marinas - Australia (ANZFMW, 2000).

Parámetro	Unidad	Ecosistema acuático		Recreación y usos estéticos	Agricultura/acuicultura		
		Agua dulce	Aguas marinas		Ganadería	Acuicultura	
						Agua dulce	Agua marina
pH	-	-	-	6.5-8.5	-	5.0-9.0	6.0-9.0
Sólidos totales en suspensión	mg/l	-	-	1000	-	40	-
Arsénico total (As)	mg/l	0.5	-	0.05	0.5-5	0.05	0.03
Aluminio (Al)	mg/l	0.15	-	0.2	5	0.01-0.03	0.01
Amonio (N)	mg/l	2.3	1.7	0.01	-	0.02-0.03	0.1
Bario (Ba)	-	-	-	1	-	-	-
Boro (B)	mg/l	1.3	-	1	5	-	-
Cadmio total (Cd)	mg/l	0.0008	0.036	0.005	0.01	0.0002-0.0018	0.0005-0.005
Cianuro (CN)	mg/l	0.018	0.014	0.1	-	0.005	0.005
Cloruros	-	-	-	400	-	0.003	0.003
Cromo hexavalente (Cr)	mg/l	0.040	0.085	-	-	-	-
Cromo total	-	-	0.176	0.05	1	0.02	0.02
Cobalto (Co)	mg/l	-	0.15	1	1	-	-
Cobre total (Cu)	mg/l	0.0025	0.008	-	0.4-5	0.005	0.005
Fluoruro	-	-	-	-	2	-	-
Hierro disuelto (Fe)	mg/l	-	-	0.3	-	0.01	0.01
Plata (Ag)	-	0.0002	0.0026	0.05	-	0.003	0.003
Plomo total (Pb)	mg/l	0.0094	0.012	0.05	0.1	0.001-0.007	0.001-0.007
Radio 226	-	-	-	-	5	-	-
Radio 228	-	-	-	-	2	-	-
Manganeso (Mn)	mg/l	3.6	-	0.1	-	0.01	0.01
Mercurio total (Hg)	mg/l	0.0054	0.0014	0.001	0.002	0.001	0.001
Molibdeno (Mo)	mg/l	-	-	-	0.15	-	-
Níquel (Ni)	mg/l	0.017	0.56	0.1	1	0.1	0.1
Nitrógeno total	-	-	-	-	-	1	1
Fosfato (P)	mg/l	-	-	-	-	0.1	0.05
Selenio (Se)	mg/l	0.034	-	0.01	0.02	0.01	-
Sulfuros	-	0.026	-	0.05	-	-	-
Sulfatos	-	-	-	400	1000	-	-
Plata (Ag)	mg/l	0.0002	-	-	-	-	-
Uranio 238 (Bq/L)	-	-	-	-	0.2	-	-
Vanadio (V)	-	-	-	-	-	0.1	0.1
Zinc total (Zn)	mg/l	0.031	-	5	20	0.005	0.005

4.8.2 Aire

Australia no cuenta con normas que regulan la emisión de contaminantes a la atmósfera, presenta estándares de calidad de aire (Tabla 4.30). Esta norma fue emitida por el Consejo Nacional para la Protección del Medio Ambiente el año 1998. Esta medida fue elaborada por los gobiernos en consulta con profesionales de la salud, grupos ambientalistas y la comunidad en general.

Tabla 4.30: Estándar de calidad de aire - Australia (Department of the Environment and Heritage of Australia, 2005).

Parámetro	Unidad	Límite para el promedio		Límite para el promedio anual
		8 hrs	24 hrs	
Monóxido de carbono (CO)	ppm	9	-	-
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	ppm	0.12	-	0.03
Ozono (O ₃)	ppm	0.10	-	0.08
Dióxido de sulfuro (SO ₂)	ppm	0.2	0.08	0.02
Plomo (Pb)	µg/m ³	-	-	0.5
Partículas PM ₁₀	µg/m ³	-	24	-
Partículas PM _{2.5}	µg/m ³	-	25	8

4.8.3 Suelo

Australia no cuenta con una norma o reglamento que regule la descarga de residuos sólidos procedentes de la actividad minera.

4.9 Banco mundial

En 1998, el Banco Mundial publicó el manual de prevención y reducción de la contaminación, este manual fue realizado para proporcionar orientación que promueva técnicas de buena gestión y producción más limpia a las personas y empresas consultoras que forman parte de los proyectos que se encuentran relacionados con la emisión de contaminantes. En este manual se establecieron los niveles máximos permisibles para la descarga de contaminantes al agua y al aire. Las descargas de efluentes líquidos y emisión de aire se encuentran reguladas según el tipo de industria correspondiendo al sector minero: la minería de metales y minerales de hierro.

4.9.1 Agua

Los niveles máximos permisibles de contaminantes (Tabla 4.31) en la descarga de efluentes líquidos están establecida según la actividad industrial realizada, la actividad minera está comprendida en las guías para minería de metales básicos y minerales de hierro. Estos niveles serán medidos durante la etapa de operación y después del cierre de la mina, los valores se presentan a continuación:

Tabla 4.31: Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes para minería de minerales de hierro y metales básicos (World Bank, 1998).

Parámetro	Unidad	Máximo valor
pH	-	6 – 9
Sólidos totales en suspensión TSS	mg/l	50
Aceites y grasas	mg/l	10
Cianuro	mg/l	1
Cianuro Libre	mg/l	0.1
Ácido débil disoluble WAD	mg/l	0.5
COD	mg/l	150
Arsénico	mg/l	0.1
Cadmio	mg/l	0.1
Cromo hexavalente	mg/l	0.1
Cobre	mg/l	0.5
Hierro	mg/l	3.5
Plomo	mg/l	0.2
Mercurio	mg/l	0.01
Níquel	mg/l	0.5
Zinc	mg/l	2
Metales totales	mg/l	10

El Banco Mundial especifica que los niveles máximos correspondiente al PH y sólidos totales en suspensión deberán monitorearse a diario. Se realizarán monitoreo mensual a los metales y productos químicos empleados en el proceso de flotación siendo la frecuencia de monitoreo en aquellos casos que se requieran tratamientos.

4.9.2 Aire

El manual publicado por el Banco mundial presenta una tabla con valores que corresponde a “Requerimientos de emisión de aire: Parámetros y máximos valores”. Se menciona que esta tabla no presenta valores de límites máximos permisibles para las actividades mineras. Los niveles máximos permisibles (Tabla 4.32) para la emisión de ruidos presentados por el Banco Mundial serán medidos con receptores de sonido ubicados fuera de los límites del proyecto.

Tabla 4.32: Niveles máximos permisibles para emisión de ruido (World Bank, 1998).

Receptor	Máximo valor permitido (mediciones por hora) en dBA	
	Horario diurno (07:00-22:00)	Horario nocturno (22:00-07:00)
Residencial, institucional y educacional	55	45
Industrial, comercial	70	70

4.9.3 Suelo

El Banco Mundial no establece límites máximos permisibles de contaminantes en el suelo.

Además, en el manual de prevención y reducción de la contaminación del Banco Mundial, especifica que es necesario asegurar que el funcionamiento de una instalación no dé lugar a un deterioro de la calidad del suelo, el aire y, las aguas superficiales y subterráneas. Las

condiciones de los permisos deben incluir medidas adecuadas para evitar las emisiones no controladas, así como la supervisión periódica para evitar fugas, derrames, incidentes o accidentes que se produzcan durante la utilización del equipo y el almacenamiento.

4.10 Comparativo de normas ambientales

Se realizó un cuadro comparativo de las tablas presentadas previamente y que fueron obtenidas de las normas de México, Perú, Canadá, Chile, Estados Unidos, Unión Europea, Sudáfrica y Banco Mundial.

Comparativo de normas de descargas de aguas residuales de mina

El resumen de los límites máximos de descarga se presenta en la Tabla 4.33. En esta se menciona los parámetros de medición con el respectivo país.

Tabla 4.33: Comparativo de normas de descarga de aguas residuales de mina.

Parámetro	Unidad	México	Canadá	Estados Unidos	Perú	Chile	Unión Europea	Sudáfrica	Australia	Banco Mundial
Temperatura	°C	40	-	-	-	30*	-	-	-	-
pH	-	5-10	6.5-8.5	6-9	6-9	6-8.5	-	-	6.5-8.5	6-9
Sólidos totales en suspensión	mg/l	40	25	20-30	25	80	-	-	40*	50
Sólidos totales disueltos	mg/l	-	2500	-	-	-	-	-	-	-
Sólidos sedimentables	mg/l	1	-	-	-	5	-	-	-	-
Demanda química de oxígeno DBO	mg/l	-	-	100-500	-	35	-	-	-	-
Toxicidad	mg/l	-	100-80	-	-	-	-	-	-	-
Aceites y grasas	mg/l	15	10	-	16	20	-	-	-	10
Ácido débil soluble WAD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5
Metales pesados	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10
Arsénico total (As)	mg/l	0.1	0.1	0.5	0.08	0.5	0.15	-	0.03*	0.1
Arsénico trivalente (As ₃)	mg/l	-	0.05	-	-	-	-	-	-	-
Aluminio (Al)	mg/l	-	0.5	1.0	-	5	-	-	0.01*	-
Amonio (N)	mg/l	-	1	-	-	-	-	-	0.01	-
Antimonio (Sb)	mg/l	-	0.25	-	-	-	-	-	-	-
Bario (Ba)	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
Boro (B)	mg/l	-	-	-	-	0.75	-	-	1	-
Cadmio total (Cd)	mg/l	0.1	0.01	0.05	0.04	0.01	0.05	-	0.0002*	0.1
Cianuro (CN)	mg/l	1.0	0.1	-	0.8	0.2	-	-	0.005*	1
Cianuro libre	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1
Cloruros	mg/l	-	-	-	-	400	-	-	0.003	-
Cromo hexavalente* (Cr)	mg/l	-	-	-	0.08	0.05	-	-	0.040	0.1
Cromo total	mg/l	0.5	-	-	-	2.5*	0.5	-	0.02*	-
Cobalto (Co)	mg/l	-	0.5	-	-	-	-	-	0.15	-
Cobre total (Cu)	mg/l	4.0	0.05	0.15	0.4	0.1*	0.5	-	0.0025	0.5
Estaño (Sn)	mg/l	-	-	-	-	0.5*	-	-	-	-

Continuación de Tabla 4.33: Comparativo de normas de descarga de aguas residuales de mina.

Parámetro	Unidad	México	Canadá	Estados Unidos	Perú	Chile	Unión Europea	Sudáfrica	Australia	Banco Mundial
Flúor (F)	mg/l	-	2.5	-	-	-	-	-	-	-
Fluoruro	mg/l	-	-	-	-	1.0	-	-	2	-
Hidrocarburos fijos	mg/l	-	-	-	-	10	-	-	-	-
Hidrocarburos totales	mg/l	-	-	-	-	5*	-	-	-	-
Hidrocarburos volátiles	mg/l	-	-	-	-	1*	-	-	-	-
Hierro disuelto (Fe)	mg/l	-	0.3	0.5-1.0	-	2*	-	-	0.01	3.5
Plata (Ag)	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	0.0002	-
Pentaclorofenol	mg/l	-	-	-	-	0.009	-	-	-	-
Poder espumógeno	mg/l	-	-	-	-	7	-	-	-	-
Plomo total (Pb)	mg/l	0.2	0.05	0.3	0.16	0.05	0.2	-	0.001	0.2
Radio 226	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	5	-
Radio 228	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	2	-
Manganeso (Mn)	mg/l	-	0.1	-	-	0.3	-	-	0.01	-
Mercurio total (Hg)	mg/l	0.005	0.005*	0.001	0.0016	0.001	0.03	-	0.001*	0.01
Molibdeno (Mo)	mg/l	-	0.5	-	-	0.07*	-	-	0.15	-
Níquel (Ni)	mg/l	2	0.2	0.1	-	0.2	-	-	0.017	0.5
Nitrato	mg/l	-	10	-	-	-	0.5	-	-	-
Nitrógeno total (N)		15	-	-	-	10	-	-	-	-
Nitrógeno total K	mg/l	-	-	-	-	50*	-	-	1	-
Fósforo (P)	mg/l	5	-	-	-	2*	-	-	-	-
Fosfato (PO ₃)	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	0.05	-
SAAM						10	-	-	-	-
Selenio (Se)	mg/l	-	0.05	-	-	0.01	-	-	0.01	-
Sulfuros	mg/l	-	-	-	-	1	-	-	0.026	-
Sulfatos	mg/l	-	-	-	-	1000	-	-	400	-
Talio (Tl)	mg/l	-	-	-	-	-	0.05	-	-	-
Tetracloroetano	mg/l	-	-	-	-	0.04	-	-	-	-
Tolueno	mg/l	-	-	-	-	0.7	-	-	-	-
Triclorometano	mg/l	-	-	-	-	0.2	-	-	-	-
Plata (Ag)	mg/l	-	0.05	-	-	-	-	-	0.0002	-
Uranio 238 (Bq/L)	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	0.2	-
Vanadio (V)	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-
Xileno	mg/l	-	-	-	-	0.5	-	-	-	-
Zinc total (Zn)	mg/l	10	-	0.5-0.75	1.2	3	1.5	-	0.005	2

De la Tabla 4.33 se observa que el país que cuenta con mayor cantidad de parámetros de medición es Chile seguido de Australia y Canadá. Además, se tiene:

- Sólo México y Chile presentan límites de temperatura con valores de 40 y 30 °C respectivamente.
- Respecto a los intervalos de valores de pH se menciona que México presenta el menor y mayor valor de pH, siendo de 5 y 10, respectivamente.
- Canadá, Estados Unidos y Perú cuentan con menores valores de sólidos totales en suspensión (SST), siendo de 20 y 25 mg/l.

- Respecto a los límites máximos permisibles referente a los metales pesados, cada país cuenta con diferentes procedimientos de medición, haciendo difícil comparar estos parámetros.

Los procedimientos de medición, frecuencia de monitoreo, tiempo de exposición entre otros factores, hacen que la comparación de los parámetros entre países no pueda ser directa. No obstante, la Tabla 4.33 permite identificar aquellos parámetros de contaminantes que no son tomados en cuenta en las normas y regulaciones de descarga de los países con actividad y presencia minera.

Comparativo de normas de descargas al aire provenientes de mina

Los parámetros de medición de descarga al aire observados, difieren del tipo, forma de medición, valores de medición, así como la frecuencia de monitoreo. La Tabla 4.34 corresponde a la norma emitida por USEPA perteneciente a Estados Unidos. En esta norma se especifica de forma más detallada el parámetro de medición, la forma y el tiempo de monitoreo.

Tabla 4.34: Niveles máximos permisibles de calidad de aire (CFR Title 40 Part 440, 2004).

Parámetro	Primaria/ secundaria	Tiempo promedio	Concentración media aritmética $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ppm)	Forma
Monóxido de carbono (CO)	primaria	8 horas	(9)	No debe excederse más de una vez al año
		1 hora	(35)	
Plomo (Pb)	primaria y secundaria	Continuo cada 3 meses en promedio	0.15	No debe ser excedido
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	primaria	1 hora	100 ppb	Percentil 98 de las concentraciones máximas diarias de 1 hora, promediados durante 3 años
	primaria y secundaria	1 año	53 ppb	Promedio anual
Ozono (O ₃)	primaria y secundaria	8 horas	0.070 ppb	Concentración diaria máxima de 8 horas, la cuarta más alta, promediada durante 3 años
Contaminante particulado (PM)	PM _{2.5}	primaria	1 año	Promedio anual, promediada en 3 años
		secundaria	1 año	promedio anual, promediada en 3 años
		primaria y secundaria	24 horas	35
	PM ₁₀	primaria y secundaria	24 horas	150
Dióxido de azufre (SO ₂)	primaria	1 hora	75 ppb	Percentil 99 de concentraciones máximas diarias de 1 hora, promediadas durante 3 años
	secundaria	3 horas	0.5 ppm	No debe excederse más de una vez al año

Las normas de emisión de los demás países definen el tipo de contaminante, tiempo de exposición y la forma de medición a realizar durante la verificación de la calidad de aire presente en el medio ambiente. Además, se menciona:

- Chile y la Unión Europea cuentan con directivas que definen los umbrales de medición o niveles de alerta de calidad de aire.
- México es el país que diferencia los límites máximos permisibles para emisión de partículas sólidas según la zona de aplicación (zonas críticas y resto del país).
- La Unión Europea especifica los valores límites objetivos a mediano y largo plazo.

En el comparativo de emisión sonora se menciona que México define los niveles más bajos para emisión de ruido, el valor correspondiente es 65 dBA para las zonas industriales.

Comparativo de normas de descargas de residuos sólidos de mina

Respecto a las regulaciones de emisión de contaminantes al suelo se tiene que solo México cuenta con parámetros de emisión (Tabla 4.35). Las demás normas de otros países cuentan con instrucción o clasificaciones de los residuos.

Tabla 4.35: Niveles máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto líquidos PECT y base seca (NOM-157-SEMARNAT-2009, 2009).

Parámetro	LMP (mg/l)	LMP (mg/kg)
	PECT	Base seca
Antimonio (Ab)	0.53	10.6
Arsénico (As)	5.00	100
Bario (Ba)	100.0	2000
Berilio (Be)	1.22	24.4
Cadmio (Cd)	1.00	20
Cromo (Cr)	5.00	100
Mercurio (Hg)	0.20	4
Plata (Ag)	5.00	100
Plomo (Pb)	5.00	100
Selenio (Se)	1.00	20

Es importante mencionar que la cantidad de contaminantes en un cuerpo no solo define el nivel de peligrosidad de este al medio ambiente o al ser humano. El efecto combinado de la cantidad de contaminantes junto al tiempo de exposición provoca mayores efectos nocivos.

Desde el punto de vista económico, el cumplimiento de las leyes y normas requieren costos y riesgos financieros a futuro, a pesar de que se logra el cumplimiento a lo largo de la vida de una operación minera. En países como Canadá, Estados Unidos o Australia, entre otras naciones avanzadas, se tienen leyes ambientales exigentes y complejas que están diseñadas para proteger al público y al medio ambiente. Las sanciones van desde fuertes multas hasta la terminación de las operaciones e incluso el encarcelamiento de las partes responsables. La presencia de metales pesados en el ambiente puede desencadenar diversas intoxicaciones causando daños irreparables en la salud humana y animal, tan graves como efectos teratogénicos (malformaciones en embriones o fetos), cáncer e incluso la muerte.

5 ASPECTOS GEOTÉCNICOS PARA EL DISEÑO DE DEPÓSITOS MINEROS

5.1 Consideraciones previas

Los aspectos geotécnicos involucrados en la actividad minera comprenden la aplicación del conocimiento del comportamiento de suelos, rocas, aguas subterráneas y al estudio de las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales provenientes de la tierra. Para diseñar estructuras tales como oficinas, campamentos, plantas de beneficio, puentes, depósitos de relaves, vertederos de roca de desecho, terraplenes, excavaciones, túneles o tiros, aprovechamientos a cielo abierto, caminos de accesos, pozas de monitoreo, sistemas de tuberías y bombas, sistemas de derivación de agua, sistemas de monitoreo piezométrico y de desplazamiento, entre otros elementos.

Con la aplicación de los conceptos geotécnicos es posible tomar las acciones necesarias para que una operación minera presente una adecuada estabilidad. Esto permite que las personas trabajen sin sufrir lesiones o accidentes fatales, no se afecten comunidades cercanas y/o ubicadas aguas abajo del depósito, no ocurran daños ambientales y desde el punto de vista operacional de la mina aseguren la estabilidad de las instalaciones y todas las actividades asociadas a la actividad minera.

Los aspectos que influyen en el diseño de un proyecto minero incluyen el medio ambiente (se define la línea de base ambiental), la geología, las condiciones del suelo de cimentación y materiales de préstamo, comportamiento del residuo minero, aguas superficiales y subterráneas, y la sismicidad. Otros aspectos pueden provenir del equipamiento propio e infraestructura de la mina, como ejemplo, vibración debido a los equipos de molienda, maquinaria y equipos con asentamientos restrictivos y otros elementos para propósitos estructurales y operacionales.

En este capítulo se hace énfasis en la caracterización del residuo minero. En la etapa de diseño este material no está disponible para caracterizarlo. Es por ello que se hace uso de información y experiencia de operaciones similares y que fueron reportadas en la literatura. En algunos casos se obtienen resultados de análisis realizados al mineral a extraer en plantas de beneficio de iguales características a la que operará en la mina. En las etapas de construcción y operación la caracterización del residuo minero se realiza tanto en campo como en laboratorio, analizando muestras alteradas e inalteradas, además, de hacer uso de la instrumentación geotécnica instalada alrededor y dentro de las instalaciones a monitorear de la mina.

Con la información y evaluación del residuo minero recopiladas durante la etapa de construcción y operación, se debe definir si los parámetros de diseño fueron los adecuados; en caso contrario modificar el diseño realizado o reestructurar el mismo.

5.2 Exploración geotécnica en depósitos de residuos

El principal objetivo del reconocimiento de campo es obtener la mayor información posible de los materiales presentes en los depósitos. La accesibilidad al lugar, topografía, estratigrafía del suelo, estabilidad, ángulo de inclinación, litología y estructura de la roca, caracterización del macizo rocoso, condiciones de drenaje superficial y subterráneo,

filtraciones o manantiales y otra información sobre el flujo del agua subterránea, son algunos de los estudios a realizar, los cuales incluyen el reconocimiento de campo, junto a la experiencia de los encargados para llevar a cabo la exploración. Además, el empleo de herramientas como mapeo geológico, fotografías aéreas, pozos de prueba y perforaciones geotécnicas, conforman los elementos básicos en la etapa de exploración.

Las actividades a realizar durante la exploración geotécnica deben estar a cargo de geólogos, geotécnicos, hidrogeólogos y demás profesionales que complementen los trabajos relacionados en el diseño y evaluación. La información que se obtiene en el reconocimiento de campo y la revisión de la información del lugar ayudan a definir el alcance de las investigaciones subsecuentes.

Estudios geofísicos

Permiten obtener de manera rápida y en grandes áreas información del subsuelo sobre una base de perfiles continuos. Las principales aplicaciones se dan para:

- Estimar la estratigrafía, determinar el espesor de los estratos, conocer la profundidad hasta el lecho de roca e identificar las principales anomalías como canales profundos, cavidades y estructuras enterradas.
- Ubicar acuíferos, determinar la calidad del agua y los focos de contaminación; localizar y definir depósitos de agregados y otros materiales de construcción; detectar filtraciones de agua subterránea o vías de fuga.
- Detectar vacíos y elementos enterrados como pozos, depósitos y antiguas construcciones.
- Estimar algunas propiedades de los estratos y su variación espacial.

Los estudios geofísicos se basan en un contraste significativo con propiedades físicas, por ejemplo: densidad, velocidad de ondas de corte, resistividad eléctrica y magnetismo. Estos métodos se diferencian en: invasivos o destructivos como los ensayos de refracción sísmica, reflexión sísmica, análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y vibración ambiental; y; los no invasivos o no destructivos como son los ensayos up-hole, down-hole y cross-hole. En la Tabla 5.1, se presenta un resumen de los métodos geofísicos existentes y de mayor aplicación en la etapa de exploración.

Tabla 5.1: Resumen de métodos geofísicos (modificado de Rowe, 2001).

Método	Procedimiento o características principales	Aplicaciones y limitaciones
Refracción sísmica	Tiempo de llegada de ondas sísmicas desde la fuente de energía a los puntos de medición de geófonos. La refracción de las ondas sísmicas en las interfases de diferentes materiales proporciona diferentes tiempos de llegada.	Se obtienen velocidades de onda V_p y V_s , que permiten estimar propiedades dinámicas, además, estimar los espesores de estratos alcanzando 30 m de profundidad.
Reflexión de alta resolución	Tiempos de llegada de las ondas sísmicas reflejadas en las interfases de los estratos adyacentes.	Identificación de la profundidad del lecho rocoso. Ubica el agua subterránea.
MASW	Determinar la velocidad de la onda de corte V_s utilizando los registros de ondas Rayleigh de alta frecuencia.	Estratigrafía en términos de tipo de suelo, espesor y propiedades como el módulo G o E , en conjunto con la refracción sísmica.
Vibración ambiental	Velocidad de las ondas transversales o de corte y periodo fundamental del suelo T_s .	Estratigrafía en términos de tipo de suelo, espesor y propiedades como el módulo G o E .

Continuación de Tabla 5.1: Resumen de métodos geofísicos (modificado de Rowe, 2001).

Método	Procedimiento o características principales	Aplicaciones y limitaciones
Up-hole, down-hole y cross-hole	Medida de tiempos de viaje. Geófonos en la superficie y fuente de energía en la perforación o geófono en el fondo del pozo con fuente de energía en la superficie.	Se obtienen velocidades de ondas de corte V_p y V_s . No confiable para estratos irregulares o estratos blandos con alto contenido de grava.

Además, de los ensayos de la Tabla 5.1 se tienen los métodos de resistividad eléctrica, magnética y gravedad, que son de aplicación en el diseño de depósitos mineros. Las técnicas geofísicas complementan la exploración geotécnica; no son sustitutos de la perforación, el muestreo y las pruebas en campo. Pueden aplicarse para interpolar las condiciones del suelo entre perforaciones e indicar dónde se necesitan más perforaciones para investigar a mejor detalle cualquier anomalía presente (Figura 5.1).

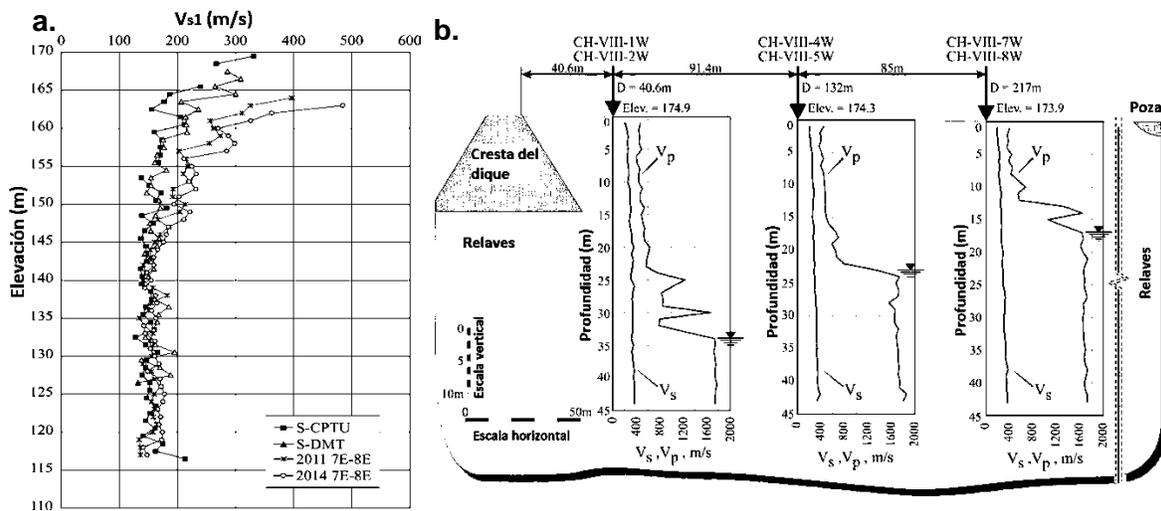


Figura 5.1: a) Perfiles de velocidad de onda de corte de relaves obtenidos a partir de la prueba de cross-hole, S-DMT y S-CPTU. b) Ubicación de la profundidad de saturación a partir de mediciones de V_p y V_s de un depósito de relaves de cobre en Polonia (Jamiolkowski y Masella, 2014).

Muestreo y sondeos geotécnicos

La obtención de muestras depende del tipo de material que se pretender extraer y de la accesibilidad para obtenerlos. La obtención de muestras puede realizarse en pozos a cielo abierto que permiten observar de manera directa el perfil del suelo y obtener muestras alteradas o inalteradas.

Los sondeos se clasifican en dos tipos, de rotación (con corona y con lavado “wash boring”, menos deseable en su empleo) y los de percusión y presión (penetración estándar SPT, penetración dinámica, tubo Shelby).

- Sondeos con broca de diamante, permiten la extracción de muestras inalteradas de roca según el tipo de pared del tubo extractor.
- Sondeos a percusión y presión, permite adaptar muestreadores como el tubo de pared delgada abierto “Shelby” (no aplicable a suelos duros), muestreadores de pistón que son similares al de pared delgada y los muestreadores de barril Denison.

La ejecución de pruebas de campo permite conocer el comportamiento del material involucrado en el diseño del depósito de residuos. En la Tabla 5.2, se presentan algunos ensayos de mayor aplicación.

Tabla 5.2: Resumen de aplicaciones de ensayos de campo (Santoyo, 2010; Rowe, 2001).

Tipo de ensaye	Suelos y rocas		Aplicaciones y limitaciones
	Aplicable	No aplicable	
Ensayo de penetración estándar (SPT)	Arena, limo, arcillas y grava	Roca	Se obtienen muestras alteradas y el número de golpes N, permite caracterizar el suelo y obtener la compacidad en suelos granulares.
Ensayo dinámico de cono (DCPT)	Arena, limo, arcilla y grava	Roca	Evaluación cualitativa de la variabilidad de la compacidad.
Ensayo de penetrómetro dinámico ligero (PANDA)	Arena, limo y arcilla	Gravas y rocas	Obtiene la resistencia dinámica de cono q_d y mediante correlaciones empíricas se calculan las presiones en el suelo y el grado compactación.
Ensayo de penetración Becker	Material gruesos y fragmentos de roca	Rocas	Evaluación cualitativa de la compacidad.
Ensayo de cono	Arena suelta, limo y arcilla blanda.	Gravas, till	Se obtiene mediante correlaciones empíricas compacidad relativa y propiedades de consolidación. Existen sensores de presión de agua y de ondas sísmicas. La profundidad de sondeo está limitada a la compacidad o consistencia del suelo.
Ensayo de veleta (FVT)	Arcilla, limo plástico	Arena, grava, till, limos no plásticos o turba	Resistencia al corte no-drenada, S_u .
Ensayo con presiómetro	Roca blanda, arena, limo y arcilla.	Arcillas blandas sensitivas.	Se obtiene módulo de deformación, existen correlaciones empíricas para definir otros parámetros complementarios.
Ensayo con dilatómetro	Arena, limo y arcilla.	Gravas y till.	Permite obtener módulos de deformación, además, mediante correlaciones se estiman valores de resistencia y compacidad relativa.
Prueba de placa	Todos los suelos y rocas	-	Determinan las características carga-deformación y el módulo de deformación.
Ensayos de bombeo y permeabilidad	Todos los suelos y rocas	-	Evaluación del coeficiente de permeabilidad.
Down-hole, up-hole y cross-hole	Todos los suelos	-	Mide V_s y V_p , estima módulo de elasticidad E y módulo cortante G.
Ensayo Lugeon	Rocas	En suelos	Útil para investigar rocas con fallas o diaclasas y proyectar los tratamientos (inyecciones) a realizar, cuando son necesarias cortinas de impermeabilización o para fijar posibles pérdidas.
Ensayo Lefranc	Arena, limo, grava y rocas muy fracturadas	Arcillas y rocas sanas	Permite obtener la permeabilidad promedio de un estrato.

Estos ensayos presentados en la Tabla 5.2 forman parte de la información de campo y son de importancia cuando las labores de muestreo resultan difíciles, como es el caso en los depósitos de relaves con altos contenidos de arenas que tienden a perder fácilmente su estructura por falta de cohesión entre sus partículas.

La calidad de las muestras obtenidas depende de los métodos de perforación utilizados, el equipo de muestreo y la experiencia del personal a cargo de los sondeos geotécnicos. La exploración en campo se realiza para estimar parámetros físicos, mecánicos, hidráulicos y

dinámicos de los materiales presentes en el diseño. Con estos parámetros y complementado con la información obtenida en laboratorio es posible la caracterización geotécnica de los materiales presentes en el diseño de un depósito minero y para evaluar o comparar en la etapa de operación los parámetros empleados en el diseño.

5.3 Características geotécnicas de los residuos mineros

Conocer las características geotécnicas de los residuos permite realizar análisis del comportamiento de un depósito en etapas de diseño, construcción, operación y de cierre. Se describirán de manera resumida las características que influyen en las propiedades físicas y mecánicas.

5.3.1 Propiedades índice

Se refieren a aquellas propiedades que indican el tipo y condición del suelo, además permiten determinar de manera práctica y rápida características que se relacionan con la resistencia, compresibilidad, expansión y permeabilidad (Tabla 5.3).

Tabla 5.3: Propiedades índice y ensayos de clasificación por tipo de suelo (modificado McCarthy, 1993).

Tipo de suelo	Propiedad índice	Tipo de ensaye
Granulares	Distribución y tamaño de partículas	Análisis granulométrico por tamizado o ensaye de sedimentación.
	Forma de partículas	Visual.
	Presencia de partículas finas	Análisis granulométrico por tamizado
	Peso volumétrico en campo y compacidad relativa	Peso volumétrico en campo y ensaye de compacidad relativa.
	Clasificación	Análisis granulométrico o identificación visual.
Finos	Dilatancia, resistencia en estado seco, tenacidad (consistencia)	Identificación en campo.
	Contenido de agua	Contenido de agua.
	Plasticidad	Límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico).
	Clasificación	Identificación visual y límites de Atterberg.
	Presencia y tipo de arcilla	Indirecta de la identificación de la plasticidad y cambio de consistencia, y/o de análisis mineralógico a la arcilla.

La gravedad específica y concentración de sólidos no se presentan en la Tabla 5.3, pero se menciona que es de aplicación para residuos granulares y finos.

Granulometría

La granulometría de los residuos mineros se obtiene por análisis granulométrico mediante tamizado y método de sedimentación (en caso de analizar residuos finos). La distribución del tamaño de partícula es definida por el proceso de molienda, trituración, el tipo de mineral y procesos geológicos, siendo los procesos mecánicos realizados en las operaciones en planta las que determinan la angulosidad de las partículas. Los resultados de los análisis de la Figura 5.2, ilustran la gama de tipos de clasificación que se encuentran en diferentes residuos por el tipo de mineral extraído. La distribución real del tamaño de partícula de un residuo dependerá de factores como la finura a la que se tritura el mineral, la mineralogía, el grado de desgaste del mineral y el proceso de separación o extracción realizadas en las operaciones en planta.

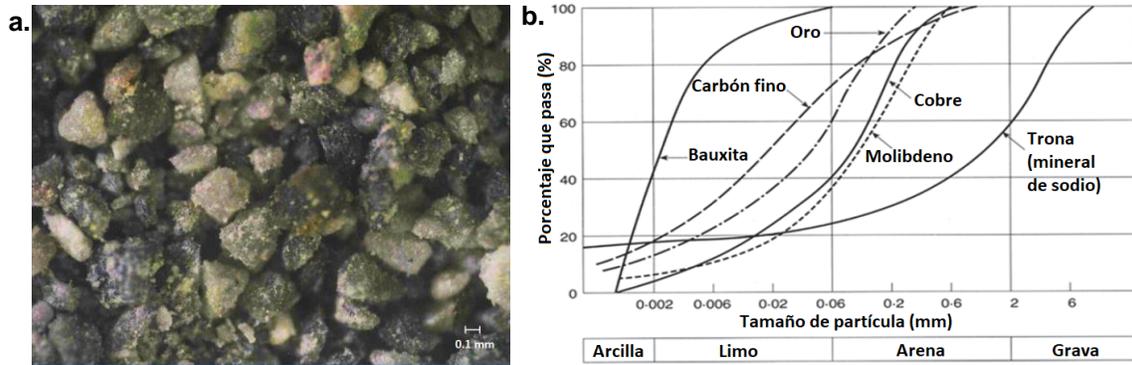


Figura 5.2: a) Fotografía microscópica de muestra de arena de relaves y b) curvas típicas de distribución de tamaño de partículas de relaves (modificado de Sarsby, 2013; Maureira y Verdugo, 2010).

La granulometría de las rocas de desechos que se depositan en vertederos de roca (Figura 5.3c), presentan variación respecto a la profundidad debido a la segregación de la roca durante el vertido (Figura 5.3a y 5.3b). Esta heterogeneidad se debe a las variaciones en las propiedades de composición que se vieron afectadas por el origen geológico, la operación minera, el proceso de disposición y los procesos de intemperismo ocurridos en la zona de almacenamiento.

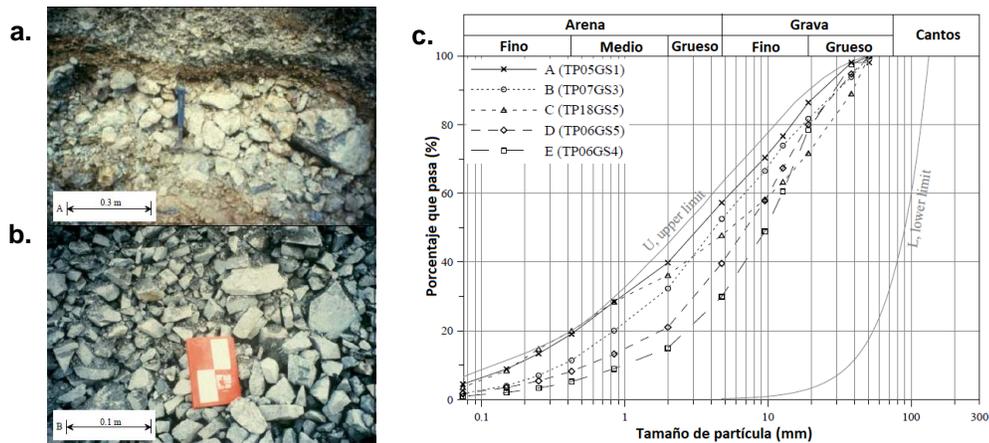


Figura 5.3: Estructura interna de la roca de desecho en un vertedero, a) material en estrato, b) material nuevo superficial, y c) curvas de distribución granulométrica de rocas de desecho (modificado de Herasymuik, 2006).

La zona de estratos gruesos que se encuentran en la base de los vertederos ocurre debido a la disposición por gravedad, las partículas más gruesas caen con mayor rapidez cuando son descargados.

Gravedad específica

La gravedad específica depende directamente del origen mineralógico, presentando variaciones en el cual los minerales pesados se hacen presentes, aumentando considerablemente a su vez los pesos volumétricos y por consiguiente el comportamiento esfuerzo-deformación. Esta propiedad se obtiene dividiendo el peso volumétrico de sólidos y el peso volumétrico del agua.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad \dots (5.1)$$

Donde:

G_s = Peso específico relativo de sólidos (densidad de sólidos).

W_s =Peso de la fase sólida de la muestra.

V_s =Volumen de la fase sólida de la muestra.

γ_w =Peso volumétrico del agua destilada a 4 °C de temperatura y a la presión atmosférica correspondiente al nivel del mar.

Peso volumétrico en campo o densidad in-situ

Se emplea para determinar el peso por unidad de volumen de un suelo en su estado natural en campo o de un relleno artificial, como es el caso de los residuos mineros que son colocados en estado suelto o compactados. Un mayor valor de peso volumétrico presenta una mejor resistencia al corte y a la compresión, reduciendo las posibilidades de fallas por corte y asentamientos. Este parámetro también es importante para determinar el grado de compactación en los trabajos de relleno controlado en campo.

En la práctica se obtiene el valor de peso volumétrico en campo realizando una cavidad en el terreno de volumen conocido y el peso del material retirado del mismo, la relación de este peso con el volumen de la cavidad proporciona el peso volumétrico en campo. Existen otros métodos y equipos empleados en la obtención del peso volumétrico, como son el método del cono de arena, método de reemplazo de agua y el método con densímetro nuclear, siendo este último de menor aplicación por los efectos generados por la manipulación en su operación y almacenamiento.

Contenido de agua

Esta propiedad presenta un efecto significativo en las propiedades mecánicas de los residuos cuando se emplean con objetivos de construcción. El contenido de agua se obtiene de la relación entre el peso del agua presente en el material de residuo y el peso seco del mismo.

$$\omega(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad \dots (5.2)$$

Donde:

ω (%) = Contenido de agua en una muestra expresado en porcentaje.

W_w = Peso de agua presente en la muestra.

W_s = Peso de las partículas sólidas de la muestra.

Compacidad relativa

La compacidad relativa influye en el comportamiento de la resistencia estática y dinámica de los residuos mineros, presentándose mayores resistencias al corte y a la compresión cuando se encuentran en estado compacto o denso. La compacidad relativa se obtiene de la comparación entre la relación de vacío en campo y las relaciones de vacío en los estados más densos y más sueltos obtenidos en laboratorio.

$$C_R(\%) = \frac{e_{m\acute{a}x} - e_0}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}} \quad \dots (5.3)$$

Donde:

C_R = Compacidad relativa en porcentaje.

$e_{m\acute{a}x}$ = Relación de vacíos en el estado más suelto.

$e_{m\acute{i}n}$ = Relación de vacíos en el estado más denso o compacto.

e_0 = Relación de vacíos en el estado natural.

Plasticidad

Se refiere a la cantidad de arcilla contenida en un suelo. Esta cantidad y el contenido de agua presentes en un residuo otorgan características plásticas modificando sus propiedades mecánicas e hidráulicas. Aquellos residuos con alto índice de plasticidad presentan baja permeabilidad, caso contrario ocurre con un índice de plasticidad bajo que resulta con alta permeabilidad. El índice de plasticidad se obtiene de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo. En la Tabla 5.4 se tiene un resumen de valores típicos de propiedades índice.

Tabla 5.4: Valores de propiedades índice de algunos relaves (modificado de Sarsby, 2013; Hu et al., 2016).

Material	Gravedad específica (Gs)	Relación de vacíos (e)	Contenido de agua (%)	Peso volumétrico seco (kN/m ³)	Fuente
Arcillas arenosas de Cobre	2.76	-	67	-	Hu et al, 2016
Arenas limosas de Cobre	2.77	-	39	-	
Arcillas arenosas de Hierro	3.08	-	43	-	
Arenas limosas de Hierro	3.23	-	43 - 54	-	
Limos de Oro	3.17	1.05	-	14.7	Sarsby, 2013
Limos de Plomo	2.6 - 2.3	0.6 - 1.1	-	12.7 - 17.6	
Arenas de Molibdeno	2.7 - 2.8	0.7 - 0.9	-	14.7 - 15.7	
Limos de Pirita	4.3	0.5 - 0.8	-	23.5 - 28.4	
Arenas de Taconita	3.0	0.7	-	17.6	
Limos de Taconita	3.1 - 3.3	0.9-1.2	-	14.7 - 16.6	
Limos de Bauxita	2.8 - 3.3	8.0	-	3.92	
Arenas y limos de Cobre	2.79	0.4 - 1.0	-	17.4	Shamsai, 2007
Arenas de Cobre	2.6 - 2.8	0.6 - 0.8	-	14.9 - 17.5	Volpe, 1979
Limos de Cobre	2.6 - 2.8	0.9 - 1.4	-	11.2 - 14.4	

Concentración de sólidos

La compacidad o concentración de sólidos se refiere a la relación que tiene el volumen o flujo volumétrico de sólidos entre el flujo o flujo volumétrico de la pulpa y está expresada en porcentaje. Para entender el concepto de esta propiedad se menciona que el acero tiene una compacidad de 100% y el aire de 0%. Un residuo tipo relaves puede tener valores de aproximadamente de 50% o más, dependiendo de la forma en que se deposita (Flores et al., 2010).

$$C = \frac{V_s}{V_t} = \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \quad \dots (5.4)$$

$$C = \frac{1}{1+e} = \frac{1}{1+\frac{w}{S_r}G_s} \dots (5.5)$$

Donde:

C= Concentración de sólidos en porcentaje.

V_s =Volumen de sólidos.

V_t =Volumen total.

γ_d =Peso volumétrico seco (γ_d = peso de sólidos/volumen total).

γ_s =Peso volumétrico de sólidos (γ_s = peso de sólidos/volumen de sólidos).

e = Relación de vacíos (e =volumen de vacíos/volumen de sólidos).

w =Contenido de agua.

S_r =Grado de saturación (S_r =Volumen de agua/volumen de vacíos).

G_s =Densidad relativa de sólidos.

Las propiedades índice permiten reconstituir las muestras alteradas y llevarlas al peso volumétrico en campo o en otros casos llevarlas a diferentes condiciones a emplear durante el diseño.

5.3.2 Permeabilidad

Este parámetro es importante porque permite estimar el flujo de agua y fuerzas de filtración durante el diseño y evaluación de los depósitos mineros. La permeabilidad k se obtiene de la ley de Darcy, que relaciona el flujo de agua dentro de una sección debido a un gradiente.

$$k = \frac{Q}{Ai} \dots (5.6)$$

Donde:

k = coeficiente de permeabilidad (m/s).

Q = flujo a través de una sección (m^3/s).

A = área de la sección (m^2).

i = gradiente hidráulico.

Existen varias maneras de medir la permeabilidad. Puede ser medida en laboratorio (Tabla 5.5) y en campo (Tabla 5.2). Las pruebas en campo son realizadas en barrenos en la profundidad que se desea conocer la permeabilidad.

Tabla 5.5: Resumen de aplicaciones de ensayos en laboratorio para medir la permeabilidad (modificado de Rowe, 2001).

Tipo de ensaye	Suelos y rocas		Aplicaciones y limitaciones
	Aplicable	No aplicable	
Permeabilidad a carga constante	Arenas, arcillas y gravas.	-	Obtención de la permeabilidad k .
Permeabilidad a carga variable	Arenas y gravas	Arcillas	Obtención de la permeabilidad k .
Permeámetro de pared flexible	Arenas, arcillas y gravas.	-	Obtención de la permeabilidad k .

El tipo de colocación y disposición define la estratificación horizontal y vertical en un depósito de residuos, esto influirá no sólo en la ubicación y trayecto de la superficie

freática, sino también en posibles pérdidas de filtración a través del material depositado. En la Tabla 5.6 se muestra un resumen con algunos valores de permeabilidad de relaves.

Tabla 5.6: Resumen de permeabilidad de algunos relaves (modificado de Hernández, 2016).

Tipo de material	Permeabilidad k (cm/s)
Arena cicloneada gruesa (< 15% de finos)	1.0×10^{-2} - 1.0×10^{-3}
Arena depositada en la playa (< 30% de finos)	1.0×10^{-3} - 1.0×10^{-4}
Relaves no plásticos	1.0×10^{-4} - 1.0×10^{-5}
Relaves de baja plasticidad	1.0×10^{-5} - 1.0×10^{-6}
Relaves finos de alta plasticidad	1.0×10^{-7} - 1.0×10^{-8}

Conocer la permeabilidad permite mediante análisis de flujo de agua identificar zonas con altos gradientes y efectuar las medidas de drenaje correspondientes.

5.3.3 Características de resistencia al esfuerzo cortante

En el diseño geotécnico es importante conocer las condiciones de drenaje y de almacenamiento que el residuo presenta en campo. Vick en 1990, presentó un resumen de intervalos de valores de ángulo de fricción (Tabla 5.7) y los esfuerzos efectivos aplicados a conjunto de residuos con diferentes mineralogías.

Tabla 5.7: Valores típicos del ángulo de fricción ϕ de los residuos (modificado de Vick, 1990).

Material	Φ (°)	Rango de esfuerzos efectivos (kPa)
Residuos de Cobre		
Arenas	34	750
Limos	33 - 37	625
Residuos de Taconita (mineral de hierro)		
Arenas	34.5 - 36.5	-
Limos	33.5 - 35.0	-
Residuos de Plomo-Zinc-Plata		
Arenas	33.5 - 35.0	-
Limos	30.0 - 36.0	-
Limos de Oro	28.0 - 40.5	900
Residuos de Carbón Fino	22 - 39	0 - 270
	22 - 35	0 - 1100
Limos de Bauxita	42	0 - 175
Relaves de Yeso	32 ($c' = 22$ kPa)	0 - 450

En la Tabla 5.8 se muestra un breve resumen de los ensayos en laboratorio de mayor aplicación en el diseño de depósitos, aplicados para la obtención de parámetros de resistencia estáticos o dinámicos según el tipo de análisis a realizar durante el diseño o evaluación.

Tabla 5.8: Resumen de ensayos de laboratorio para obtener parámetros de resistencia (modificado de Rowe, 2001).

Tipo de ensaye	Suelos y rocas		Aplicaciones y limitaciones
	Aplicable	No aplicable	
Corte directo	Arenas y arcillas	Gravas	Parámetros de resistencia máximo y residual ϕ y c en condiciones drenadas en suelo y en interfase suelo-geosintético u otro material a analizar.
Triaxiales	Arenas, arcillas y gravas	-	Se obtienen parámetros de resistencia c y ϕ en esfuerzos totales o efectivos, además de módulo de elasticidad E . Se obtienen a partir de cualquiera de los tres tipos de pruebas dependiendo de las condiciones de carga en campo.
Triaxial cíclico	Arenas y arcillas	Gravas	Los esfuerzos y deformaciones unitarias medidas permiten obtener valores del módulo de cortante (G) y relación de amortiguación (ξ). Generalmente las deformaciones unitarias son mayores a 0.01%.
Columna resonante	Arenas y arcillas	Gravas	Se somete a cargas torsionales o axiales, con el valor de la frecuencia de resonancia se determina V_s , para luego obtener G , ξ , y E .
Corte simple cíclico	Arenas y arcillas	Gravas	Consiste en aplicar una fuerza cortante cíclica para obtener parámetros dinámicos como G y ξ .
Consolidación unidimensional	Arenas y arcillas	Gravas	Parámetros de compresibilidad y de compresión.

Es importante que los residuos sean ensayados bajo la compacidad relativa de campo y el rango de esfuerzos que simulen las condiciones a los que serán sometidos.

Resistencia al corte drenada

La resistencia drenada es la resistencia del suelo cuando se carga con suficiente lentitud para que no haya exceso de presión de poro inducida por cargas aplicadas. Valores típicos de ángulo de fricción drenados ϕ' se presentan en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9: Valores típicos de parámetros de resistencia drenada CD, de algunos relaves (modificado de Vick, 1990; Hernández, 2016).

Material	ϕ' (°)	c' (kPa)	Rango de esfuerzos efectivos (kPa)	Fuente
Arcillas arenosas de Hierro	35	28.5	-	Hu et al., 2016
Arenas limosas de Hierro	40	30.1	-	Hu et al., 2016
Arenas y finos de Oro	29.6	12.0	-	Fengxia, 2013
Arenas y finos de Oro	32.6	11.0	-	Fengxia, 2013
Arenas y finos de Cobre	32 - 36	12.0	-	Campaña, 2013
Arenas de Cobre	34	-	0.0 - 816.0	Mittal y Morgenstern 1975
Arenas de Cobre	33 - 37	-	0.0 - 672.0	Volpe, 1979
Limos de Cobre	33 - 37	-	0.0 - 672.0	Volpe, 1979
Limos de Oro	28.0 - 40.5	-	960.0	Blight y Steffen, 1979

Resistencia al corte no-drenada

La resistencia no drenada se da cuando las cargas se aplican más rápido de lo que el suelo puede drenar y es empleada para evaluar la respuesta de los materiales presentes de un depósito en construcción y en operación, denominándose condiciones a corto plazo. En la Tabla 5.10 se presentan resultados de ensayos triaxiales realizados a algunos residuos sometidos a condiciones no drenadas en laboratorio.

Tabla 5.10: Valores típicos de parámetros de resistencia no drenada CU, de algunos relaves (Modificado de Hu et al., 2016; Hernández, 2016).

Material	Relación inicial de vacíos e_0	Φ' (°)	Cohesión c (kPa)	Fuente
Arcillas limosas de Cobre	-	31	0.0	Hu et al., 2016
Arenas limosas de Cobre	-	38	71.0	Hu et al., 2016
Arcillas limosas de Hierro	-	16	13.8	Hu et al., 2016
Arenas limosas de Hierro	-	25	194.0	Hu et al., 2016
Limos de cobre	0.50 - 1.11	24 - 37	8.0 - 21.0	Shamsai, 2007
Limos de cobre	0.50 - 1.11	8 - 29	30.0 - 97.0	
Limos de cobre	-	13 - 18	0.0 - 96.0	Volpe, 1979
Arena de cobre	0.7	19 - 20	34.0 - 43.0	Wahler, 1974
Limos de cobre	0.6	14	62.0	
Limos de oro	0.9 - 1.3	14 - 24	0.0 - 19.0	

Bernal en el 2016, mediante ensayos de compresión triaxial CU en relave con clasificación SUCS como arena limosa SM, contenido de finos no plásticos de 31%. Para esfuerzos efectivos de confinamiento menores a 1.5 kg/cm² (147.1 kPa), se tiene que estos esfuerzos no exhiben influencia en la tendencia de la envolvente de falla. En cambio, la compacidad relativa si presenta influencia en la variación de la envolvente de falla (Bernal, 2016).

Los parámetros de resistencia obtenidos de ensayos no consolidados no drenados (UU), no son confiables en condiciones saturadas, debido a que la medición del exceso o disipación del exceso de presión de poro es un factor fundamental; sin embargo, en condiciones parcialmente saturadas presentan información para la evaluación de estabilidad de los depósitos. Esta condición correspondería al material ya consolidado por el efecto de la sobrelevación, cuando haya perdido humedad y se encuentre parcialmente saturado (Hernández, 2016). En la Tabla 5.11 se presenta un resumen de valores de resistencia en ensayos UU obtenidos en algunos depósitos de relaves.

Tabla 5.11: Valores de parámetros de resistencia no consolidada no drenada UU de algunos relaves (Vick, 1990; Hernández, 2016).

Material	Φ (°)	Cohesión c (kPa)	Fuente
Limos de sílice	20.67	13.0	Flores, 2010
Limo arenoso de oro	28	0.0	Blight y Steffen, 1979
Limos de Bauxita	22	70.3	Somogyi y Gray, 1977

La variación de las propiedades de los residuos mineros respecto a la ubicación en el depósito construido por el método de eje o línea central, se aprecia en la Figura 5.4.

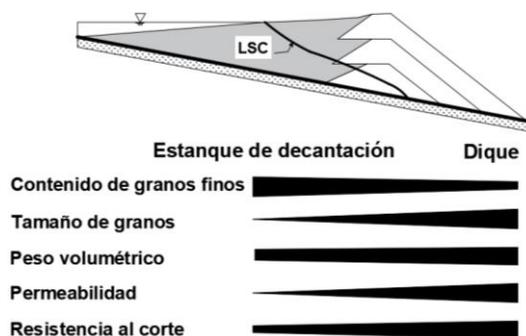


Figura 5.4: Variación de las características del residuo con respecto a la ubicación en el depósito (modificado de Witt et al., 2004).

El tamaño de partícula, peso volumétrico, permeabilidad y resistencia cortante presentan mayores valores cerca al talud aguas abajo, donde generalmente se depositan residuos gruesos como arenas o en algunos casos rocas de desecho, y decrece conforme se alejan en la dirección aguas arriba, donde son almacenados los residuos más finos y con altos contenido de agua.

5.4 Comportamiento mecánico de relaves

5.4.1 Proceso de consolidación de relaves

En los residuos mineros las pruebas de consolidación determinan la compresibilidad y la tasa a la cual se consolidará cuando sean cargados. Con frecuencia se requieren pruebas de consolidación para evaluar la cantidad de cambio de volumen que se espera de un suelo bajo carga y para permitir la predicción del tiempo que llevará la consolidación. Se pueden obtener tres propiedades de una prueba de consolidación: el índice de compresión C_c y el índice de expansión C_s que indican la compresibilidad y expansibilidad del suelo, y, el coeficiente de consolidación C_v , que indica la tasa de compresión bajo carga (Tabla 5.12).

Tabla 5.12: Parámetros de compresión, expansión y compresibilidad.

Parámetro	Ecuación
Índice de compresión C_c $\sigma_p \leq \sigma_0 + \Delta\sigma$	$C_c = \frac{e_0 - e}{\log \sigma - \log \sigma_0} = \frac{\Delta e}{\log \sigma / \sigma_0} \dots (5.7)$ <p>Donde: e_0= relación de vacíos inicial. σ_p= esfuerzo de preconsolidación σ_0= esfuerzo de consolidación inicial.</p>
Índice de expansión C_s $\sigma_0 + \Delta\sigma \leq \sigma_p$	$C_c = \frac{e_0 - e}{\log(\sigma_0 + \Delta\sigma) + \log \sigma_0} = \frac{\Delta e}{\log(\sigma_0 + \Delta\sigma) / \sigma_0} \dots (5.8)$ <p>Donde: e_0= relación de vacíos inicial. σ_p= esfuerzo de preconsolidación. σ_0= esfuerzo de consolidación inicial.</p>
Coeficiente de consolidación C_v	$C_v = \frac{TH_d^2}{t} \dots (5.8) \quad C_v = \frac{k(1+e)}{a_v \gamma_w} \dots (5.9)$ <p>Donde: T=factor de tiempo. t=tiempo. H_d= trayectoria del drenaje. e_0= relación de vacíos inicial. a_v= coeficiente compresibilidad. γ_w= peso volumétrico del agua.</p>

Los parámetros de la Tabla 5.12 se ven afectados por la relación de vacíos e , variabilidad del coeficiente de permeabilidad k y la compresibilidad del material a_v , todos los cuales varían con la distribución y el tamaño de las partículas. Se tienen registros de algunas mediciones realizadas en depósitos de residuos (Tabla 5.13).

Tabla 5.13: Valores típicos de coeficiente de consolidación C_v e índice de compresión C_c (modificado de Vick, 1990; Witt et al, 2004).

Material	e	C_c	C_v (cm ² /s)	Fuente
Arcillas arenosas de Cobre	1.03	0.085	-	Hu et al., 2016
Arenas limosas de Cobre	0.84	0.025	-	
Arcillas arenosas de Hierro	1.41	0.260	-	
Arenas limosas de Hierro	0.74	0.046	-	
Arenas de cobre	-	-	$4.3 \times 10^{-2} - 6.6 \times 10^{-1}$	Pousette, 2007
Limos de cobre	-	-	1×10^{-2}	Shamsai, 2007
Limos de cobre	-	-	$5.0 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-2}$	
Limos de oro	-	-	6.3×10^{-2}	Blight y Steffen, 1979
Arena de cobre	-	-	3.7×10^{-1}	Volpe, 1979
Limos de cobre	-	-	1.5×10^{-1}	Volpe, 1979
Limos de bauxita	-	-	$1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-2}$	Somogyi y Gray, 1977
Limos de cobre	-	-	$10^{-3} - 10^{-1}$	Mittal y Morgenstern, 1976
Limos de plomo y zinc.	-	-	$10^{-4} - 10^{-2}$	Kealy et al., 1971

La consolidación y la compresibilidad están relacionadas con el tamaño de partícula, la densidad y relación de vacíos, por tanto, son una medida del cambio del volumen total que los residuos pueden experimentar con el tiempo con la deshidratación y/o cargas impuestas.

5.4.2 Influencia de la viscosidad en la resistencia de relaves

Las partículas de menor tamaño y alto contenido de agua, como los relaves, son difíciles de manejar. Siendo la viscosidad una medida de la resistencia de un material al flujo, la presencia de sólidos en concentrados, pastas y otras mezclas de múltiples fases dan una idea de la fuerza mínima requerida para iniciar el movimiento en un material (Figuras 5.5a y 5.5b). Esto permite identificar la pendiente de la playa, posibles zonas de deslizamiento o falla de los depósitos, además, de predecir el comportamiento del residuo durante los procesos de mezcla o separación.

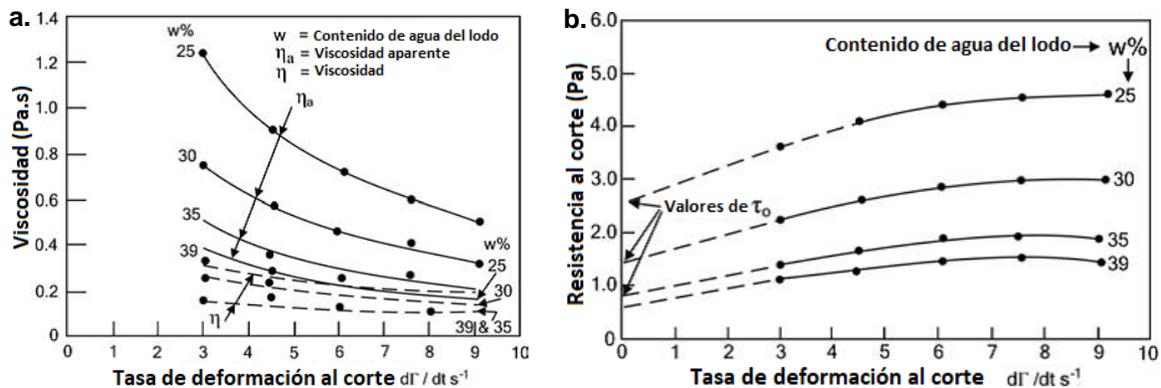


Figura 5.5: Relaves de platino, a) mediciones de viscosidad que muestran la influencia del contenido de agua, y b) variación de resistencia al corte respecto al contenido de agua (modificado de Blight, 2010).

El conocimiento de las relaciones entre la viscosidad, resistencia al corte y el contenido de agua de relaves en suspensión es importante en la evaluación de:

- Pérdidas de carga en las líneas de bombeo,
- En el talud, cuando se depositan por método de descargas espesada o en pasta, y
- La trayectoria de flujo después de salir a través de fallas en el muro externo del depósito.

5.4.3 Relaves parcialmente saturados

En los suelos, la franja más cercana a la saturación es la capilar, donde la mayor parte de los vacíos se encuentran llenos de agua, pero puede existir una fase gaseosa discontinua; es decir, se presentan vacíos de aire. Entre la zona del suelo seco y la zona donde se desarrollan tensiones capilares existe una zona intermedia que corresponde al suelo parcialmente saturado. En esta zona, el agua y el aire se encuentran ocupando los vacíos. La presión en los vacíos del suelo en esta zona es negativa, debido a la diferencia de presión entre ambas fases, es decir, a la presión del agua en los poros (u_w) y a la presión del aire en los poros (u_a) (Fredlund, Rahardjo y Fredlund, 2012).

Otro concepto importante de analizar es la succión que se define como la energía necesaria para remover el agua del suelo, la cual tiene dos componentes, una asociada al efecto de la capilaridad denominada succión mátrica ($\Psi_m = u_a - u_w$, diferencia entre la presión del aire y la presión del agua) y una componente debida a la presencia de sales disueltas en el agua, llamada succión osmótica (π) (Meza, 2012; Hernández, 2016). El grado de saturación de los residuos se reduce cuando la evaporación y evapotranspiración exceden las precipitaciones. La presión de agua en el suelo aumenta al humedecerse (valores positivos), el volumen y resistencia al corte presentan cambios. Algunos suelos exhiben hinchamientos o expansiones cuando son humedecidos y en otros pueden contraerse (Fredlund, Rahardjo y Fredlund, 2012). Los cambios en la presión negativa de agua asociada con fuertes lluvias son la causa principal de numerosas fallas en taludes.

La retención de agua en relaves finos es de importancia porque afecta directamente la capacidad de almacenamiento de un depósito. Después del almacenamiento del relave este se somete a dos procesos, de forma secuencial o simultánea:

- Disminución del contenido de agua y como consecuencia la relación de vacío por evaporación provocada por radiación solar, y
- Compresión debido a la carga de las capas superiores.

Los relaves se consolidan bajo el efecto combinado de la succión de secado y el aumento de la sobrecarga con cada ciclo de humedecimiento causando cierta sobreconsolidación. Rassam y Williams en 1999, realizaron ensayos para determinar la contribución de la succión mátrica en la resistencia de relaves de oro desecados que presentaron porcentaje de 75% arena y 25% limo en tamaño y diámetro medio D_{50} de 0.15 mm.

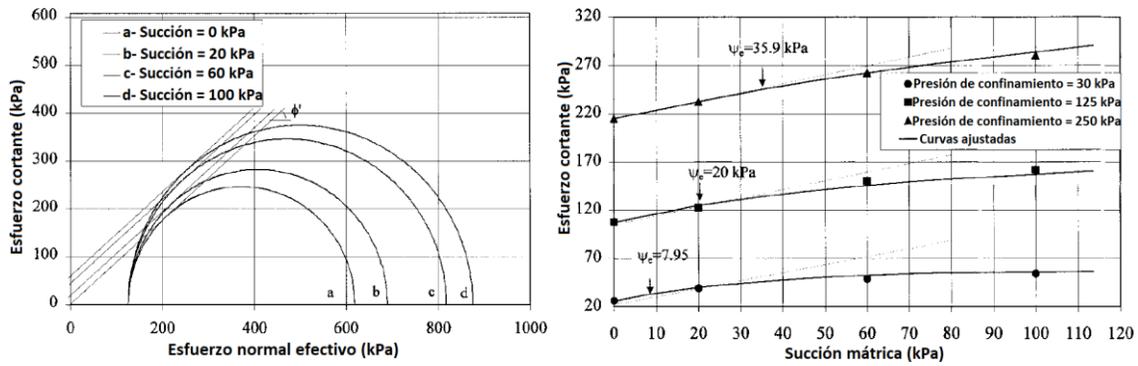


Figura 5.6: Ensayo triaxial consolidado no drenado en un residuo minero granular (modificado de Rassam y Williams, 1999).

De la Figura 5.6, las envolventes de falla tomando en cuenta la succión mátrica presentaron no linealidad para valores de confinamiento mayores a 100 kPa. Por tanto, la succión mátrica resultante conduce a las fuerzas capilares que actúan en los contactos de partículas, aumentando la resistencia del material y reduciendo su compresibilidad. Esta succión se da en función del contenido de agua. Sin embargo, tales propiedades mecánicas mejoradas se pierden rápidamente si el material se satura o pierde humedad.

En Sudáfrica se tiene evidencia de 47 depósitos de relaves tipo dique de anillo en el cual la mayoría de estos depósitos permanecieron en todo momento en condiciones parcialmente saturada. Estos trabajos de operación denominada semiseca se consiguieron proporcionando drenajes a los diques de contención para abatir la superficie freática, manteniendo la zona del estanque de agua alejada del dique de contención y adoptando una tasa lenta de llenado (aproximadamente 2 m por año) de modo que las capas sucesivas pudieran secarse y consolidarse completamente antes de ser cubiertas por el nuevo material depositado (Blight, 2010).

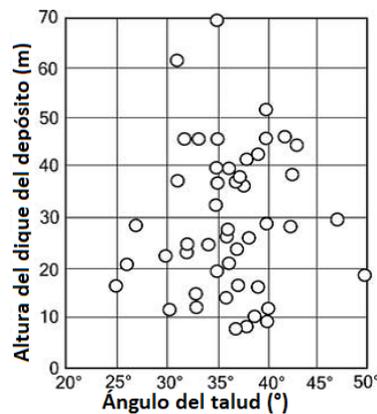


Figura 5.7: Relación entre el ángulo medio del talud externo y la altura para 46 depósitos estables de relaves de oro en una zona semiárida de África (modificado de Blight, 2010).

Esta práctica que sólo es posible en climas de pocas precipitaciones, permite construir terraplenes estables que pueden tener pendientes entre 30° y 40° de inclinación (Figura 5.7), especialmente considerando que los relaves de oro son limos sin cohesión con un ángulo de fricción aproximadamente de 35° (Blight, 2010).

5.4.4 Compactación de relaves

Los residuos en estado semiseco o seco a menudo se depositan sin compactación. Al producirse un aumento en el contenido de agua causado por lluvias intensas continuas o alguna otra fuente, puede causar una disminución repentina en la relación de vacíos, con el posterior ablandamiento de los esfuerzos y pérdida de resistencia al corte. Como medida para evitar pérdidas de resistencia existe una tendencia de las minas a compactar sus residuos dispuestos en estado semiseco o seco, dependiendo del proceso de filtrado o secado empleado en planta o durante los trabajos de disposición y descarga (Figuras 5.8a y 5.8b).

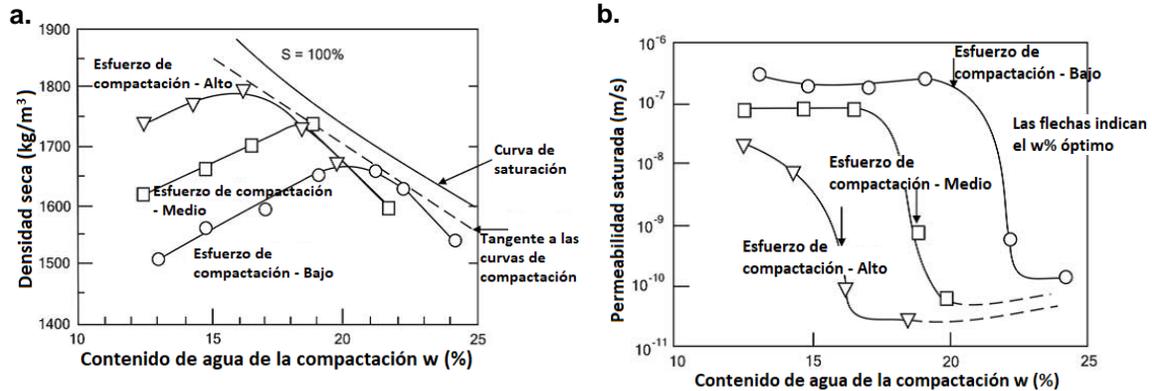


Figura 5.8: Relación entre a) contenido de agua de la compactación y densidad seca, y b) permeabilidad y contenido de agua de la compactación (modificado de Blight, 2010).

Los trabajos compactación se emplean principalmente en la disposición de residuos para:

- Terraplenes iniciales o diques de arranque (starter dam) en los depósitos, los muros al pie del talud o para la construcción de contrafuertes con materiales de residuos o materiales de préstamo.
- Construcción de coberturas impermeables con arcillas o compuestos de geosintéticos.

En el proceso de compactación en campo durante los trabajos de disposición de residuos se hacen uso de los siguientes equipos:

- Rodillos de impacto, se usan generalmente para densificar los suelos arenosos sueltos profundos y pueden ser requeridos para densificar las capas para conformación de un terraplén (Figura 5.9).
- Rodillos pata de cabra, para la compactación de capas relativamente delgadas de arcilla impermeables.



Figura 5.9: Trabajos de compactación en arenas de relave con rodillo liso vibratorio (Nyrstar, 2017).

Para realizar un adecuado control del grado de compactación durante la etapa de construcción y operación en depósitos de residuos mineros, se deben realizar pruebas de densidad de campo y pruebas de compactación en laboratorio.

5.5 Licuación de residuos mineros

La licuación es un fenómeno identificado como causa principal de algunas fallas reportadas en la literatura técnica de algunos depósitos mineros. Principalmente en el almacenamiento de relaves de arenas sueltas. Diversos autores han acuñado varios términos como licuación total, licuación parcial, movilidad cíclica y licuación de flujo, aceptándose actualmente el término genérico licuación que se refiere indistintamente a licuación de flujo y movilidad cíclica (Jaime, 2010).

- La licuación de flujo, se caracteriza porque sucede súbitamente y las masas de suelos fluyen cubriendo grandes áreas. Este tipo de falla suele ocurrir por efectos perturbadores como sismos, incremento monótonico de esfuerzos o deformaciones y cargas cíclicas (tránsito pesado, explosiones, oleaje).
- Movilidad cíclica, que es un fenómeno provocado por excitación dinámica y se manifiesta por desplazamientos permanentes del suelo, generalmente grandes, ocurriendo incrementalmente después de un tiempo de iniciado el sismo.

Comportamiento de arenas finas en ensayos triaxiales

Al ensayar una muestra de arena densa se generan inicialmente presiones de poro positivas, para luego cambiar a presiones negativas (Figura 5.10a); caso contrario, en una muestra en estado suelto la presión de poro generada es positiva en toda la aplicación de la carga (Figura 5.10b).

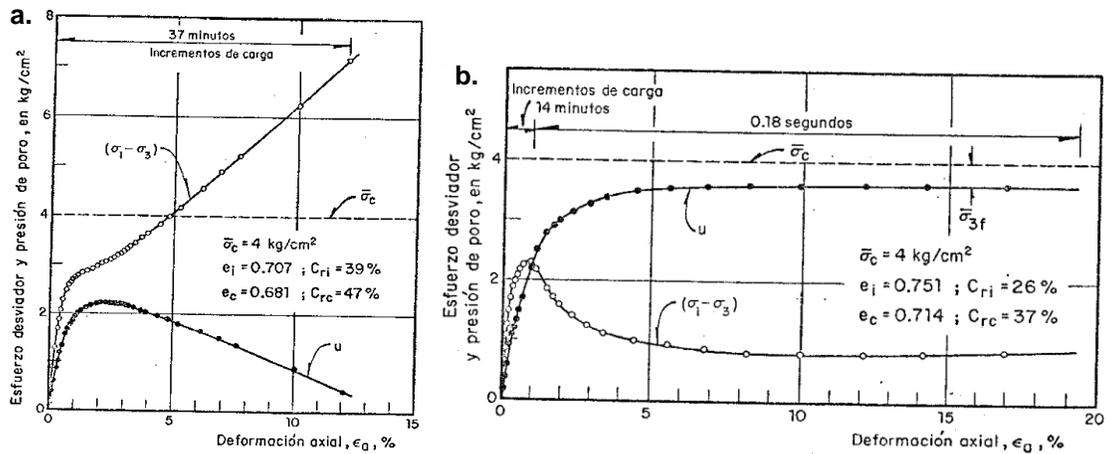


Figura 5.10: Comportamiento de arenas en condiciones no drenadas de un espécimen, a) dilatante y b) contractivo (modificado de Castro, 1969).

Los cambios en la presión de poro provocan cambios en el esfuerzo efectivo, resultando que los distintos fenómenos relacionados a la licuación requieran diferentes niveles de presión de poro, como se aprecia en la Figura 5.11, presentada por Kramer en 1996. La licuación se produce cuando las condiciones iniciales del suelo se encuentran cerca de la línea de superficie de licuación de flujo (FLS) y la magnitud de la perturbación es tal que lo lleva a la FLS. Por otra parte, la movilidad cíclica se da cuando el suelo en condiciones no drenadas exhibe un comportamiento dilatante o bien la relación de esfuerzos cortantes cíclico a estático inicial es muy pequeña y la diferencia de esfuerzo principales iniciales también es baja; ésta se representa en la zona sombreada de la Figura 5.11. La movilidad cíclica se manifiesta por desplazamientos permanentes del suelo. Estos desplazamientos se producen incrementalmente después de un tiempo de iniciada la carga cíclica, siendo la fuerza dinámica el sismo, viento, oleaje, maquinaria, entre otros. Los desplazamientos permanentes del suelo son función de la relación de esfuerzo cortante cíclico (perturbador) a esfuerzo cortante estático inicial del suelo (Jaime, 2010).

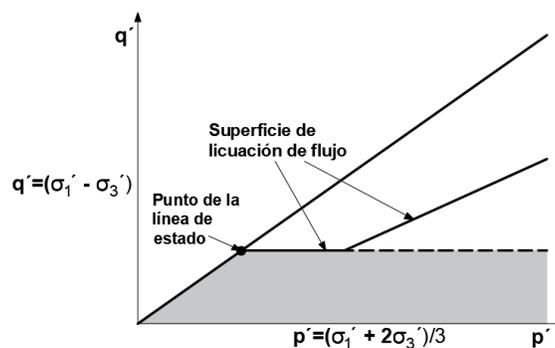


Figura 5.11: Zonas de susceptibilidad a flujo por licuación y movilidad cíclica (modificado de Kramer, 1996).

Ishihara en 1996, menciona que la licuación es un estado de suspensión de partículas generado por la liberación de contactos entre partículas de arenas. Por tanto, el tipo de material más susceptible a la licuación es aquel en el que la resistencia a la deformación se moviliza por fricción entre partículas bajo la influencia de presiones de confinamiento.

Tabla 5.14: Factores que afectan la susceptibilidad a la licuación (modificado de Ohsaki, 1966; Jaime, 1978; Jaime, 1980; Seed, 1985; Department of Transportation, 2015).

Factor	Descripción
Distribución granulométrica y tipo de suelo	El tipo de suelo más susceptible a la licuación es uno en el que la resistencia a la deformación se moviliza por la fricción entre las partículas. Si otros factores como la forma del grano, el coeficiente de uniformidad y la densidad relativa son iguales, la resistencia a la fricción del suelo sin cohesión disminuye a medida que el tamaño del grano de los suelos disminuye. Los suelos con un mayor porcentaje de gravas tienden a movilizar una mayor resistencia durante el corte y a disipar el exceso de presión de poro más rápido que las arenas.
Compacidad relativa	Los resultados de las pruebas de laboratorio y de campo indican que la relación de vacíos inicial o la densidad relativa es uno de los factores más importantes que controlan la licuación, que se produce principalmente en arenas limpias saturadas y arenas limosas que tienen una densidad relativa inferior a 50%. Para arenas densas, sin embargo, su tendencia a dilatarse durante la aplicación de esfuerzo cíclico generará presiones negativas intersticiales y aumentará su resistencia al esfuerzo cortante.
Carga sísmica	La vulnerabilidad de cualquier suelo sin cohesión a la licuación durante un sismo depende de la magnitud y el número de ciclos de esfuerzos o deformaciones inducidas, a su vez están relacionados con la intensidad, la frecuencia predominante y la duración del movimiento sísmico.
Esfuerzo efectivo vertical y sobreconsolidación	Se conoce que un aumento en el esfuerzo efectivo vertical aumenta la capacidad de carga y la resistencia al corte; por tanto, aumenta la resistencia al esfuerzo cortante disminuyendo el potencial de licuación. A partir de las observaciones de campo, varios investigadores concluyeron que las arenas saturadas ubicadas a más de 15 a 18 m probablemente no se licuen.
Edad y origen del suelo	Los depósitos naturales de origen aluvial y fluvial generalmente tienen granos de suelo en estado suelto. Estos depósitos de origen relativamente joven presentan poca resistencia debido a la cementación por el poco tiempo de envejecimiento.
Historia de deformación sísmica	Sismos de poca magnitud dan como resultado una serie de sacudidas previas que producen niveles bajos de exceso de presión de poro; esto puede aumentar significativamente la resistencia del suelo a la acumulación de presión de poro en las siguientes cargas cíclicas. Este aumento de resistencia puede resultar de una densificación uniforme del suelo o de un mejor engrane de las partículas en la estructura original, debido al reacomodo entre partículas, sin que se produzca ninguna pérdida de la estructura original. Sin embargo, grandes deformaciones asociadas con la generación de altas presiones de poro y la ocurrencia de licuación, pueden desarrollar zonas débiles debido a la densificación y redistribución desigual del contenido de agua, resultando vulnerable al incremento de presión de poro durante el siguiente esfuerzo cíclico provocado por los siguientes eventos sísmicos.
Grado de saturación	La licuación es de poca ocurrencia en suelos secos. Se pueden presentar asentamientos como resultado de la densificación durante el sismo. Los resultados de pruebas de laboratorio disponibles de varias investigaciones, muestran que la resistencia a la licuación de los suelos aumenta cuando disminuye el grado de saturación y que las muestras de arena con bajo grado de saturación pueden licuarse solo durante sismos severos y de larga duración.
Espesor del estrato	Para inducir un gran daño a nivel de la superficie del suelo por licuación, el estrato de suelo licuado debe ser lo suficientemente grande para que la presión de levantamiento resultante y la cantidad de agua y sólidos expulsados del estrato licuado, puedan provocar el colapso del suelo.

Los factores que afectan la susceptibilidad a la licuación se presenta en la Tabla 5.14, y es un resumen de las experiencias recogidas en campo y en laboratorio, por diversos investigadores (Jaime, 1978, Jaime, 1980, Seed, 1985, Department of transportation, 2015). Por tanto, factores como la distribución granulométrica, tipo de suelo, compacidad relativa, carga sísmica, esfuerzo efectivo vertical, sobreconsolidación, edad y origen del suelo, historia de deformación sísmica, grado de saturación, espesor del estrato, influyen en la respuesta del suelo cuando éste es sometido a la aplicación de esfuerzos estáticos o cíclicos.

5.5.1 Comportamiento contractivo y dilatante de relaves

Casagrande 1936, Taylor 1948, Lambe 1969, Castro 1969, Ishihara en 1996, describieron el comportamiento de esfuerzo-deformación en pruebas de corte no drenado y en pruebas triaxiales no drenadas en arenas saturadas. El comportamiento de endurecimiento por deformación (dilatante) se observó en arenas densas donde no hay ocurrencia de flujo, mientras que las arenas sueltas mostraron comportamiento de ablandamiento por esfuerzo (contractivo) presentándose evidencia de flujo. Las arenas de compacidad media mostraron ablandamiento seguido de comportamiento de endurecimiento por deformación, presentando comportamiento contractivo y dilatante (Figura 5.12). A continuación, se describe el comportamiento de arenas sometidas a esfuerzos cíclicos provocado por los sismos:

- Si las arenas sueltas saturadas están sujetas a cargas sísmicas, inducidas principalmente por la propagación de las ondas de corte del basamento de roca, tienden a sedimentarse y densificarse. Sin embargo, la duración de la aplicación de esfuerzo cíclico es tan corta en comparación con el tiempo requerido que el agua no puede drenar con suficiente velocidad, la tendencia del suelo a contraerse dará lugar al desarrollo de exceso de presión de agua, que puede disminuir el esfuerzo efectivo a cero; por tanto, las arenas pierden su resistencia al corte. A este estado se conoce como licuación. Por tanto, al perder el suelo su resistencia al corte se produce una pérdida de capacidad de carga y una deformación excesiva. Las estructuras ubicadas superficialmente o dentro de un depósito tienden a emerger; además; la mezcla de arena y agua fluye hacia arriba a la superficie a través de volcanes de arena.
- Para arenas relativamente densas se requieren más repeticiones de esfuerzos cíclicos de mayor intensidad antes de desarrollar el estado de licuación inicial. Sin embargo, las aplicaciones subsiguientes de carga sísmica conducirán a la disminución de la presión de poro causada por la tendencia a la dilatación. El suelo, por tanto, desarrollará suficiente resistencia al corte para evitar un mayor flujo. Durante el proceso de desarrollo de la resistencia, el suelo tendrá que sufrir un cierto grado de deformación. A medida que continúa la carga sísmica, la cantidad de deformación requerida para producir una condición estable puede aumentar, pero nunca llega a ser mayor que un cierto límite.

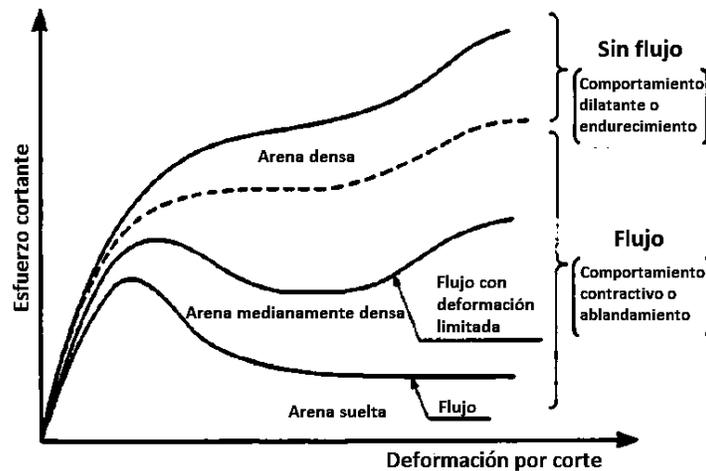


Figura 5.12: Comportamiento de arena saturada en prueba de corte no drenado (modificado de Ishihara, 1996).

5.5.2 Resistencia cíclica de relaves

La relación de resistencia cíclica (CRR) puede ser vista como la relación de la resistencia de un suelo a los esfuerzos de corte impuesto por un sismo con la sobrecarga efectiva. Actualmente, no existe un método analítico ampliamente aceptado para determinar esta resistencia cíclica de un suelo. Esto se debe a que varios de los factores que influyen en esta resistencia no se comprenden con suficiente claridad para una solución analítica precisa, utilizando propiedades del suelo que pueden medirse directamente en campo o en laboratorio. Como resultado, la relación de resistencia cíclica se basa típicamente en correlaciones empíricas con ensayos en campo, particularmente el ensayo de penetración estándar (SPT) y en menor medida el ensayo de penetración de cono (CPT), las mediciones de velocidad de onda de corte (V_s) y prueba de penetración Becker (BPT) (Idriss y Boulanger, 2008).

La evaluación de la resistencia cíclica en arenas fue dada por Seed e Idriss en el año 1982, en el cual la licuación se presenta como la función de relación de esfuerzo cíclico (CSR), que es la relación del promedio uniforme de los esfuerzos de corte durante el movimiento sísmico, τ_d , sobre el esfuerzo efectivo de sobrecarga σ'_v .

$$CSR = \frac{\tau_d}{\sigma'_v} \approx 0.65 \cdot \frac{a_{m\acute{a}x}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot r_d \dots (5.10)$$

Donde:

$a_{m\acute{a}x}$: máxima aceleración horizontal.

g : aceleración de la gravedad.

σ_v : esfuerzo total vertical.

r_d : factor de reducción que toma en cuenta la deformabilidad de la columna de suelo (se asume 1 a nivel superficial, disminuye con la profundidad).

El factor de 0.65 en la ecuación 5.10, es el resultado de la observación empírica del promedio uniforme equivalente del esfuerzo de corte que es aproximadamente el 65% del máximo esfuerzo de corte generado con la aceleración $a_{m\acute{a}x}$.

La identificación en campo de depósitos propensos al fenómeno de licuación puede ser realizada mediante el ensaye de penetración estándar SPT que es correlacionada con la relación de resistencia cíclica (Seed, et al., 1985). En la Figura 5.13 se observa esta relación con el número de golpes además del porcentaje de finos presentes en el suelo analizado.

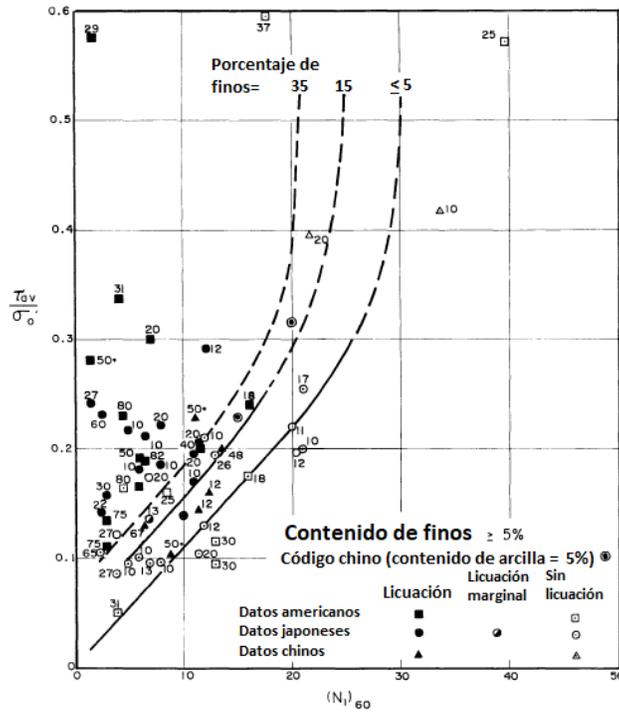


Figura 5.13: Relaciones de resistencia cíclica que causa la licuación y los valores de N_1 para arenas limosas con sismos de magnitud $M = 7.5$ (modificado de Seed et al., 1985).

Una mayor resistencia a la licuación es exhibida por arenas que contiene finos (Seed et al., 1985; Jaime, 1981; Verdugo e Ishihara, 1996; Ishihara, 1996; Flores et al., 2002). La Figura 5.14 muestra esta tendencia que depende de la naturaleza de las partículas contenidas en la arena.

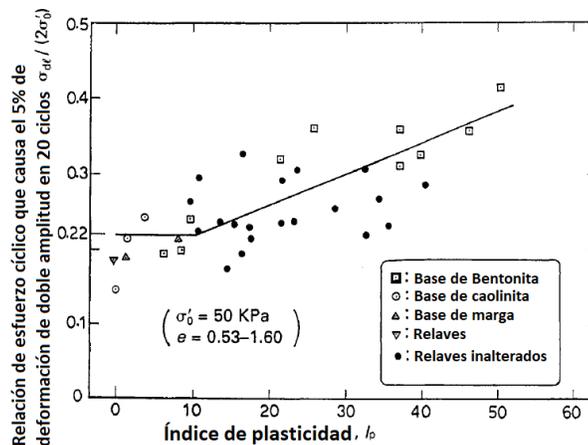


Figura 5.14: Efectos del índice de plasticidad en la resistencia cíclica de arenas con presencia de finos (modificado de Ishihara, 1996).

La licuación es una condición que debe evitarse en cualquier tipo de construcción importante dentro de una operación minera. En el capítulo 6, se presentan algunos trabajos de remediación que permiten disminuir el potencial de licuación en depósitos de residuos.

5.6 Comportamiento del enrocamiento

La roca de desecho se compone típicamente de partículas angulares de grano grueso como resultado de la extracción de mineral y se caracteriza por su baja compresibilidad, alta permeabilidad y alta resistencia al corte (Wickland et al., 2006). La investigación de la resistencia se complica por el gran tamaño de partículas de la roca comparada con los suelos. Marsal en 1979 presentó como resultados envolventes de resistencia al corte con curvas de esfuerzo efectivas en materiales de enrocamiento, confirmando la relación de la resistencia máxima de corte con la rugosidad de las juntas entre rocas; esto es apreciable en rocas de desecho que son obtenidas de trabajos de remoción con equipos mecánicos o con explosivos. El ángulo de reposo es usualmente adoptado como ángulo de fricción de la roca de desecho y se encuentra afectado por (Rowe, 1962; Marsal, 1979):

- El tamaño, forma, rugosidad, gravedad específica, de las partículas.
- Altura del depósito, pendiente del talud y si el talud es natural o artificial.
- Cantidad de agua presente.
- Condiciones de cimentación.

Además, el aumento de los esfuerzos confinantes que se dan durante la colocación de las capas superiores generan la degradación de las partículas que modifica la distribución granulométrica (Marsal, 1979).

Se debe tener en cuenta que las propiedades de resistencia cambian cuando son expuestas a ciclos de congelamiento, descongelamiento, humedecimiento, secado, o a la descarga de esfuerzos mediante excavaciones que generan la pérdida gradual de su resistencia. Las rocas de desecho más degradables son los esquistos y limonitas.

En la Figura 5.15a, la roca tiene una envolvente de falla al corte curva que es causada por la rotura progresiva de partículas a medida que se incrementa los esfuerzos de confinamiento. Estos resultados indican que los ángulos de fricción de los enrocamientos dependen del esfuerzo de confinamiento al que son sometidos (Figura 5.15b).

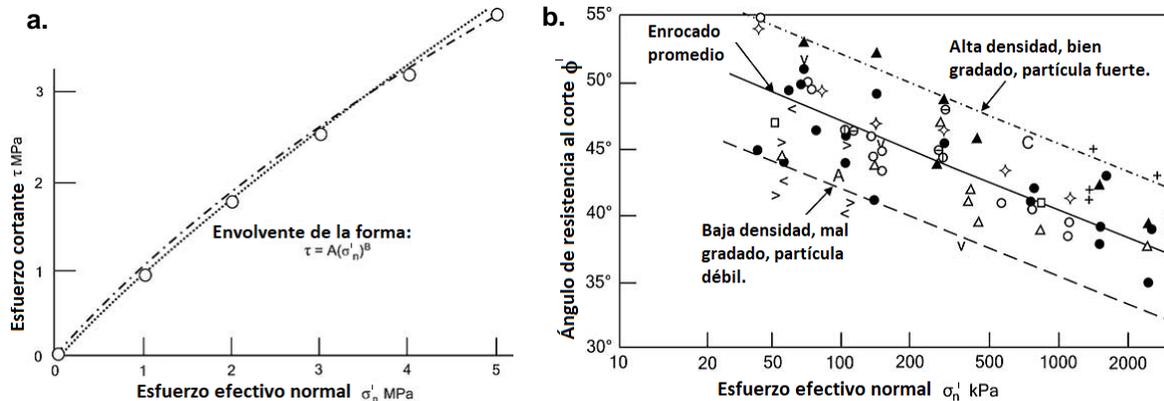


Figura 5.15: a) Ejemplo de envolventes curva para un enrocado a altos esfuerzos, y b) conjunto de valores de ϕ' respecto al esfuerzo confinante para determinar la resistencia al corte de enrocamientos (modificado de Marsal, 1979; Barton, 2008).

El comportamiento mecánico de las rocas de desecho en la evaluación de la rotura de partículas (aplastamiento) y los cambios en la relación de vacíos con la presión media indica que las altas presiones conducirían a modificaciones, es decir, a la generación de arena y finos, y a una disminución de la permeabilidad. Por tanto, es muy probable que los depósitos de roca de diferentes alturas tengan factores de seguridad diferentes, si se forman con ángulos de inclinación iguales. En vertederos de roca que generalmente son de gran altura se encuentran propensos a la degradación y deben ser diseñados para ser estables en la resistencia más baja que el material puede alcanzar.

5.7 Comportamiento mecánico de mezcla de relaves y rocas de desecho

La roca de desecho y los relaves pueden ser dispuestos conjuntamente, siendo el objetivo principal mejorar las propiedades de los materiales por separado. La disposición de estos residuos consiste en la colocación de capas delgadas de relaves (≤ 1 m) en niveles ascendentes. Este tipo de disposición genera un efecto de barrera capilar que se desarrolla en la interfase de las rocas, lo que limita la entrada de agua y oxígeno que reduce el contenido de AMD (Wickland, 2006; Lottermoser, 2010; Yilmaz, 2011).

Las mezclas pueden lograrse mediante inyección de los relaves en la roca de desecho o con equipos de movimiento de tierra. Algunas alternativas de disposición fueron expuestas por Yilmaz en 2011:

- Los residuos son mezclados antes de ser transportados al depósito. Los relaves se introducen en los vacíos de rocas de desecho que se vierten en plataformas delgadas o se introduce las rocas en relaves no consolidados. Varias investigaciones demostraron que la influencia de los relaves y las rocas de desecho en la permeabilidad para una relación de mezcla dada, varió de 20:1 a 1:1. Los resultados de la prueba para las mezclas no compactadas presentaron un valor de permeabilidad de 1×10^{-5} a 2×10^{-5} cm/s y de 5×10^{-6} cm/s para las mezclas compactadas, lo que confirma que los materiales mezclados tienen menor permeabilidad (valores de 1×10^{-3} a 1×10^{-4} cm/s) que las rocas de desecho.
- Los residuos son transportados por separado y mezclados en el mismo lugar de almacenamiento. Se demostró que el efecto de las capas de relaves de grano fino sobre la calidad del agua no es significativo cuando las capas de relaves son horizontales. Sin embargo, cuando las capas finas están inclinadas al 5%, el agua se desvía por los efectos de barrera capilar creados en la interfaz entre la roca de desecho y los relaves. En un esfuerzo por optimizar este método, varios parámetros están bajo investigación: distancia entre capas; espesor y propiedades de las capas de residuos; compatibilidad con el tamaño de partícula de los relaves y rocas de desecho; y el efecto de las condiciones climáticas.
- Los residuos se transportan por separado y se mezclan antes o durante la colocación en el depósito. Se mejora la estabilidad física y la capacidad de drenaje al agregar rocas de desecho a los relaves aumentando la tasa de consolidación, lo que mejora las propiedades geotécnicas de los depósitos.

Marsal en 1976, realizó ensayos de compresión unidimensional y ensayos triaxiales drenados con mezclas de fragmentos de roca (fracciones gruesas) con arena, limos y arcillas (fracción fina), variando en cada prueba solo el contenido de las fracciones finas.

Las mezclas fueron conformadas tomando en cuenta el tipo de compactación ya sea vibratoria o estática. Los resultados obtenidos fueron:

- Compresibilidad, en que los materiales menos compresibles son aquellas mezclas de suelo no cohesivo con fragmentos de roca, con proporción fina presente en la mezcla de 20 a 50%. La presencia de la fracción fina mejora la granulometría, permite reducir la rotura de granos de la fracción gruesa, además, mejoran los trabajos de compactación con rodillos vibratorios.
- Resistencia al esfuerzo cortante, para mezclas de arena en porcentajes de 30 a 40% de fracción fina presentaron altos valores de resistencia al esfuerzo cortante.

En la mina Cerro de Maimón, en República Dominicana, se obtuvieron resultados favorables en la colocación de relaves entre los recrecimientos de rocas de desecho, observándose un aumento en la velocidad de consolidación y aumento de la resistencia y estabilidad del depósito (Li et al., 2011).

La proporción adecuada de la mezcla está en función del contenido de agua, cantidad de finos y plasticidad de los residuos. Estos factores permiten que los residuos más finos ocupen los vacíos presentes entre las rocas de desecho, produciéndose una mezcla de residuos más homogénea en comparación con otros métodos de co-eliminación. Esta combinación genera una alta resistencia y baja compresibilidad de las rocas de desecho, con baja permeabilidad y alta retención de agua de los residuos finos, que mejoran la estabilidad.

5.8 Resistencia al corte en interfases de los residuos mineros

Las interfases se producen cuando un material se coloca sobre otro diferente, como es el caso de una geomembrana con material de relaves y un revestimiento de arcilla geosintética (GCL). La resistencia al corte de esta interfase puede ser diferente a las resistencias al corte entre los mismos materiales y debe evaluarse en cualquier situación de diseño (Figura 5.16).

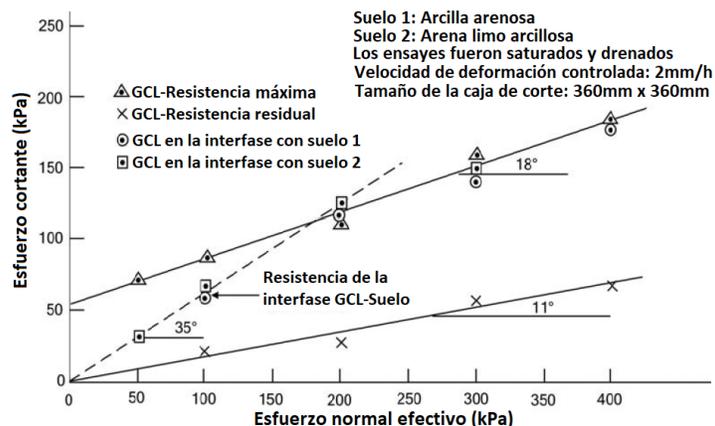


Figura 5.16: Envolventes de resistencia al corte para el núcleo de bentonita GCL e interfases entre GCL y dos suelos (modificado de Blight, 2010).

El ángulo de fricción de la interfase depende del tipo material del cual está fabricado, así como del material en contacto con el revestimiento, siendo necesario realizar ensayos que

permitan conocer el comportamiento entre estos materiales. Por tanto, se tienen las siguientes consideraciones en la interfase suelo-geosintético (Blight, 2010):

1. Los revestimientos más rígidos como el polietileno de alta densidad (HDPE) tienen ángulos de fricción más bajos que los revestimientos flexibles, como el polietileno de muy baja densidad (LLDPE) y el polivinilo de cloruro (PVC).
2. Las geomembranas texturizadas (superficies rugosas) tienen mayores ángulos de fricción en interfase con el suelo, que las geomembranas lisas.
3. La presencia de arcillas contra la interfase geomembrana produce ángulos de fricción menores que los materiales granulares.
4. El ángulo de rozamiento de las interfases entre dos capas de materiales sintéticos puede ser muy bajo, por ejemplo, entre un geosintético HDPE y un geotextil.

Para la obtención de los parámetros de resistencia de la interfase entre el suelo y un material geosintético se hace uso del ensaye de corte directo. Otro ensaye a realizar es la prueba de punzonamiento que consiste en verificar la resistencia del geosintético a la perforación cuando entra en contacto con material granular.

5.9 Efecto del envejecimiento de los residuos mineros

Los depósitos de residuos mineros son estructuras cuyas propiedades cambian en el tiempo. Es de práctica común diseñar depósitos de almacenamiento de residuos sobre la base de las propiedades geotécnicas de materiales recién producidos. Sin embargo, debe recordarse que después del almacenamiento, muchos residuos se encuentran sujetos a condiciones meteorológicas, químicas y físicas, relativamente rápidas, con el consiguiente cambio en sus propiedades geotécnicas (Troncoso, 1995).

Inicialmente un residuo grueso, poroso y de alta permeabilidad, en pocos años puede deteriorarse hasta convertirse en un material impermeable de grano fino que no permite el drenaje y presente una reducción en la resistencia al corte, debido a la exfoliación y expansión resultado de la liberación de esfuerzos. Esto puede ocasionar problemas de asentamiento y erosión, provocando intersticios por el cual se presenten filtraciones.

La resistencia al corte cíclico en función del tiempo fue investigada por Troncoso, Ishihara y Verdugo en 1988. Realizaron ensayos de resistencia a carga cíclica a muestras no alteradas de relaves, identificándolas por año de almacenamiento. Los resultados obtenidos para la muestra depositada de 30 años exhibía resistencia cíclica 3.5 veces mayor respecto a una muestra con poco tiempo de almacenamiento (Figura 5.17a y 5.17b).

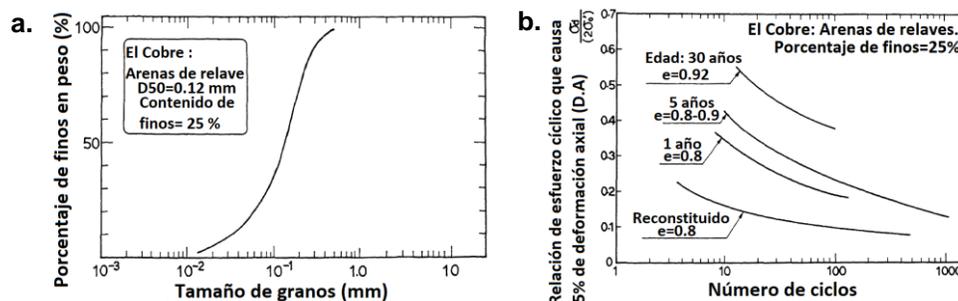


Figura 5.17: a) Curva de gradación de los relaves, b) Curvas de la relación de resistencia cíclica (5% de deformación de doble amplitud) versus el número de ciclos en relaves (finos=25%) para edades de envejecimiento de 1, 5 y 30 años (modificado de Troncoso, Ishihara y Verdugo, 1988).

Ormazábal en el año 2008, llevó a cabo ensayos en laboratorio para determinar el efecto del envejecimiento en el comportamiento de arenas de relave, verificando que este efecto se presenta en forma importante en los primeros períodos de almacenamiento (corto plazo) y disminuye su efecto con el tiempo.

Los efectos en el tiempo debido a eventos sísmicos en los depósitos de residuos, fueron estudiados por Troncoso en 1995. Expone que las vibraciones inducidas por los eventos sísmicos afectarán las propiedades de las estructuras del suelo que forman el depósito, causando la densificación bajo fuerzas dinámicas de inercia mayores que las resistencias entre las partículas del suelo, teniendo en cuenta que, si el depósito presentó problemas de licuación, su condición final será similar a la inicial sin presentar mejoramiento en sus propiedades resistentes.

Si bien el suelo mejora sus propiedades de resistencia durante el paso de los años o después de un evento sísmico, en el diseño y durante las verificaciones de operación, se deberán tener en cuenta los resultados de las mediciones realizadas en el estado actual del depósito para llevar a cabo el diseño de los recrecimientos.

5.10 Flujo de agua en residuos mineros

El flujo de agua en residuos mineros se debe comúnmente a la gravedad y para objetivos de evaluación es usualmente analizado para flujo establecido y en algunos casos para flujo transitorio cuando se requiera tener en cuenta las condiciones de recarga o descarga de agua. Estas consideraciones son de utilidad en el contexto del análisis de estabilidad porque estiman de manera conservadora la presión de agua presente en el depósito.

En un depósito, la línea superior de corriente o de flujo depende básicamente de la permeabilidad de los residuos, el nivel de agua en el estanque (poza de decantación) y las condiciones de drenaje dentro del depósito. Además, estos depósitos normalmente se basan en una playa conformada por relaves finos con el objetivo de proporcionar una barrera contra el agua. Aunque estas playas son relativamente impermeables, la cantidad de infiltración depende de las propiedades físicas de los residuos finos, la altura del depósito y el ancho de la playa. Sin embargo, se tiene en cuenta la condición de saturación parcial de los residuos, en el cual puede producirse un aumento transitorio o una depresión de la línea superior de corriente, debido a la contribución de agua infiltrada o la evaporación (Figura 5.18).

Los relaves al ser descargados en una condición suelta, tienen un proceso de consolidación por el peso de la sobrecarga creciente de los relaves depositados posteriormente. Durante la consolidación, el agua expulsada de los poros del material se une al agua infiltrada aumentando la cantidad de agua que se va a drenar del depósito. La reducción de la porosidad debido a la consolidación cambia las propiedades hidráulicas de los relaves, reduciendo la permeabilidad y aumentando el ascenso del agua por el efecto de la capilaridad; por otro lado, los relaves sobre la línea superior de corriente permanecen en condición no saturada.

Se pueden considerar muchos otros fenómenos, como cambios de fase de agua, difusión de vapor, transporte y precipitación de sólidos, cementación, formación de costras, entre otros, complicando cada vez más el modelo conceptual propuesto para el análisis. Se

espera que ocurra una gran cantidad de fenómenos fisicoquímicos de varias naturalezas dentro del depósito durante su operación, algunos de esos fenómenos pueden producir interacciones modificando las propiedades del residuo depositado. Por tanto, el análisis de flujo de agua debe considerar los cambios presentes en el depósito, como son los generados por recrecimientos, modificaciones en las estructuras de derivación de agua, así como los cambios en las propiedades hidráulicas de los residuos.

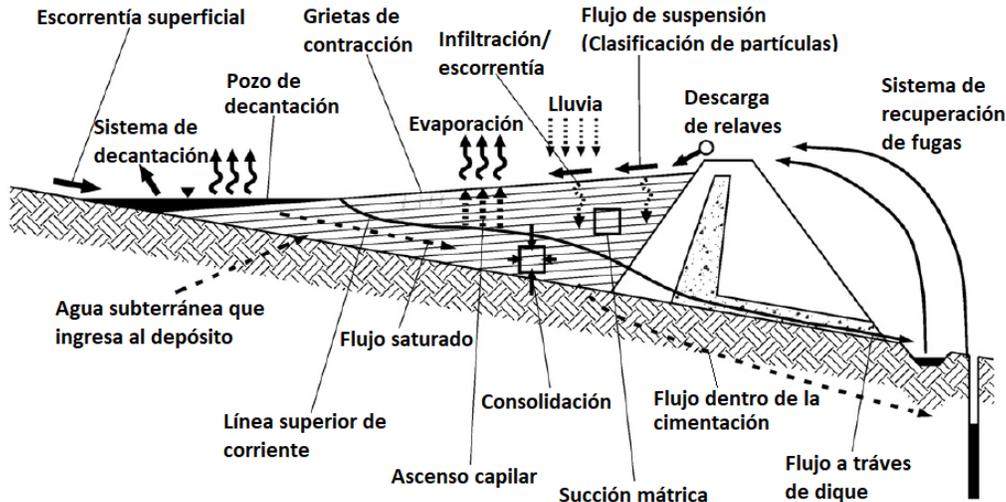


Figura 5.18: Esquema de un depósito de relaves convencional en el cual se indica los factores y fenómenos involucrados en su operación (modificado de Zandarín et al., 2008).

En vertederos de roca, el flujo de agua controla la distribución de la presión de agua intersticial dentro de la roca de desecho, que a su vez controla la estabilidad. La zona de residuos gruesos forma un drenaje en la base del vertedero y se descarga en el pie del talud; además, la compactación en la superficie restringe o disminuye la infiltración de agua dentro del vertedero (Figura 5.19).

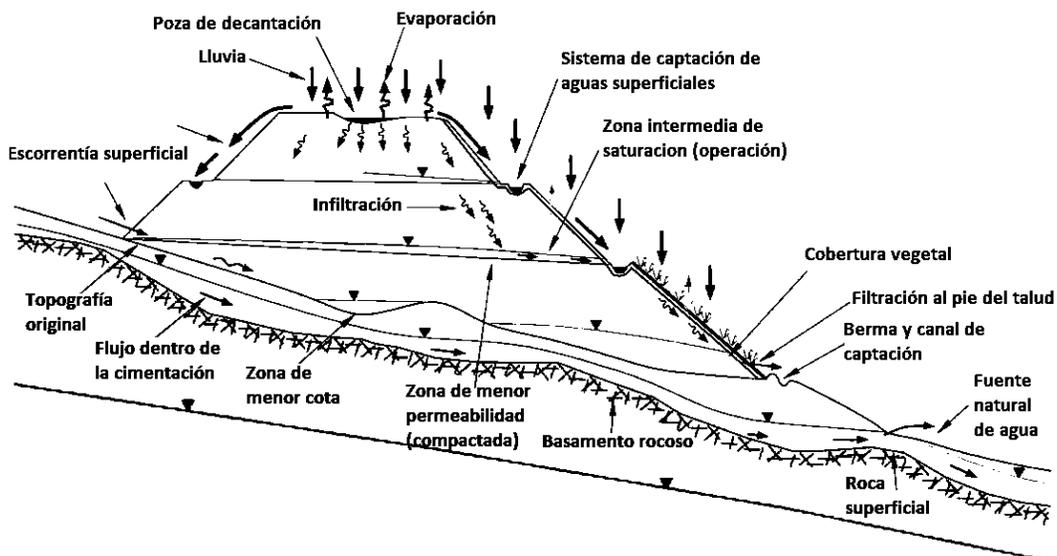


Figura 5.19: Esquema de un vertedero de rocas de desecho convencional en el cual se indica los factores y fenómenos involucrados en su operación (modificado de Hawley y Cunning, 2017).

Dependiendo de la intensidad de las lluvias y del estado del agua presente en los residuos cercanos a la superficie, una proporción de la precipitación escurrirá o se evaporará superficialmente, otra proporción se infiltrará a mayor profundidad generando el aumento temporal del volumen de agua almacenado dentro del depósito. El agua infiltrada y almacenada en un estrato cercano a la superficie se elimina posteriormente por evapotranspiración o infiltración hasta alcanzar un nuevo equilibrio, o que se produzca otro evento de infiltración y recarga por lluvias (Figura 5.20) (Hawley y Cuning, 2017).

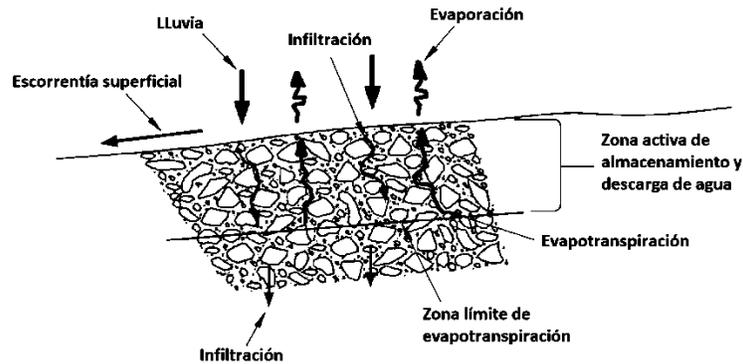


Figura 5.20: Proceso de recarga y descarga de agua dentro de un depósito (modificado de Hawley y Cuning, 2017).

La influencia de la geometría del depósito, factores climatológicos (precipitaciones, vientos, nieve), topografía, y procesos como la evaporación y evapotranspiración son notorios en zonas de climas extremos y variables (Figura 5.21). Estos factores provocan variaciones en el flujo de agua presente en los depósitos, modificando el nivel de la línea superior de corriente.

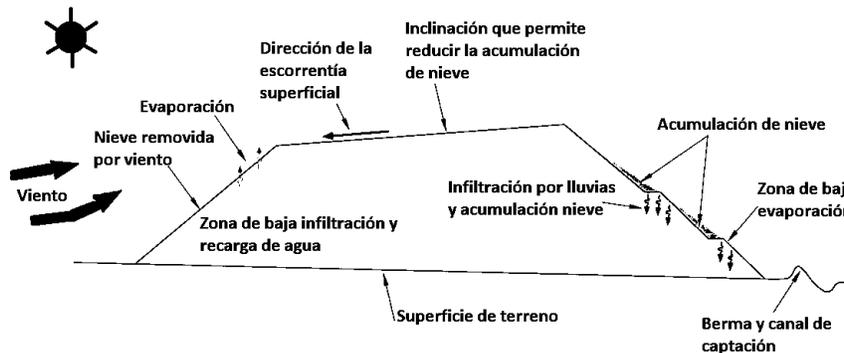


Figura 5.21: Importancia de los factores climatológicos en un depósito de residuos mineros (Hawley y Cuning, 2017).

El empleo de sistemas de subdrenaje para el control de gradientes y altas presiones es importante para el control de infiltraciones y en la estabilidad de taludes (Figura 5.22). Sin embargo, esta puede presentar algunas deficiencias debido a los riesgos que implica el funcionamiento de tuberías durante la operación (corrosión, colapso de tuberías, daños causados por asentamientos, tubificación a lo largo de las tuberías), y las dificultades que se tienen para asegurar que el sistema de drenaje aguas arriba permanezca efectivo durante toda la vida útil y evitar que se obstruya con la presencia de residuos finos.

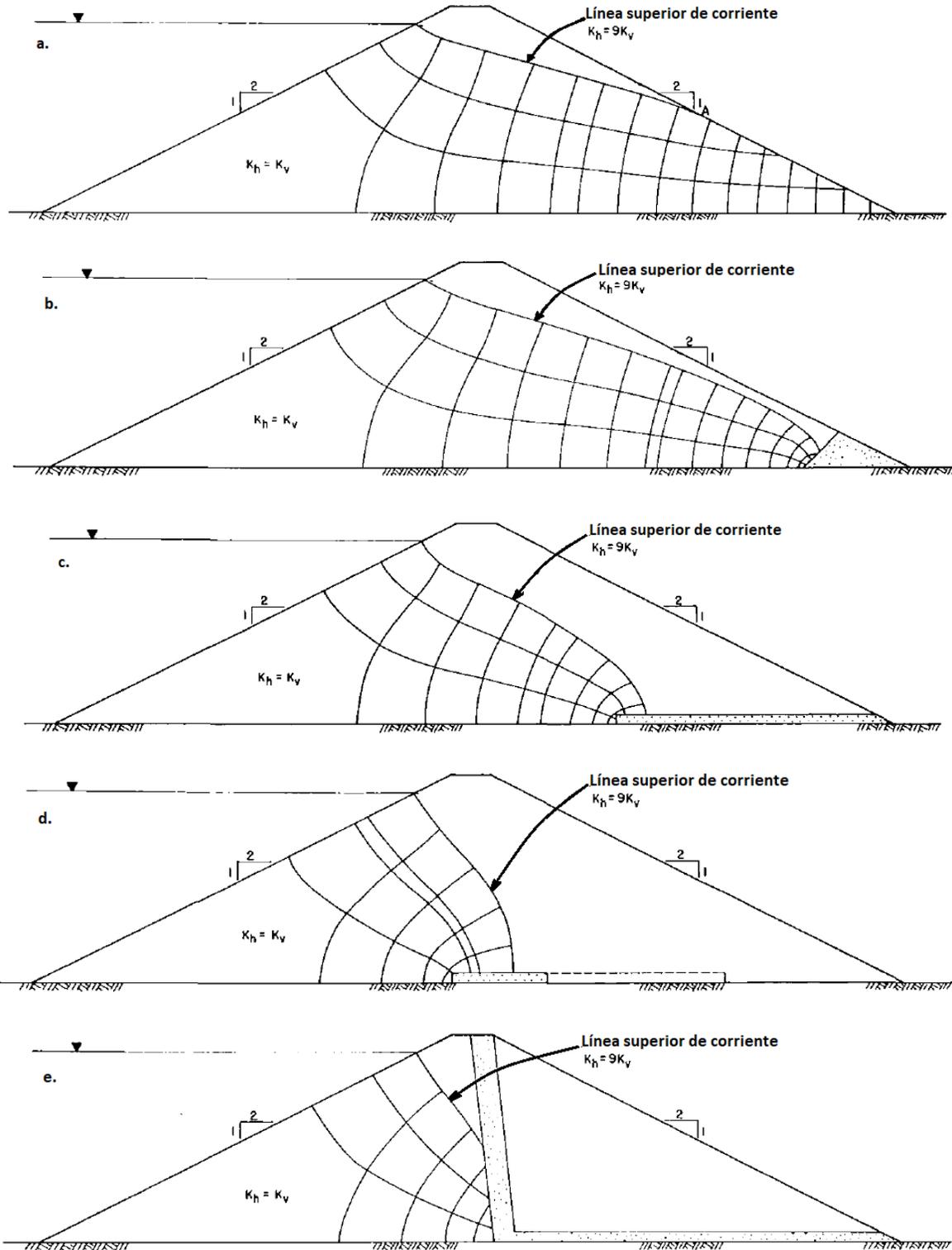


Figura 5.22: Red de flujo en un depósito homogéneo, a) sin drenaje, b) con drenaje al pie de talud, c) con drenaje tipo capa drenante (dren blanket), d) con drenaje en bandas y e) con dren inclinado (modificado de Klohn, 1979).

De la Figura 5.22a se tiene que la línea de descarga intersecta el talud aguas abajo del depósito (punto A). Por debajo del punto de intersección el talud se encuentra saturado y el agua fluye a través del mismo. Estas condiciones crean dos problemas:

- Altas presiones en el talud aguas abajo que pueden ocasionar inestabilidad.
- La presencia de altos gradientes en la salida, que puede ocasionar problemas de tubificación debido a la erosión interna.

Para mantener una superficie freática baja, es conveniente permitir un buen drenaje en el depósito al proporcionar una amplia playa (Figura 5.23), asegurando que la arena de mayor tamaño de partículas y más permeable forme la estructura del dique de contención mientras que las más finas de menor permeabilidad como las arcillas y limos se ubiquen más distantes del talud del dique (Kossov et al. 2014).

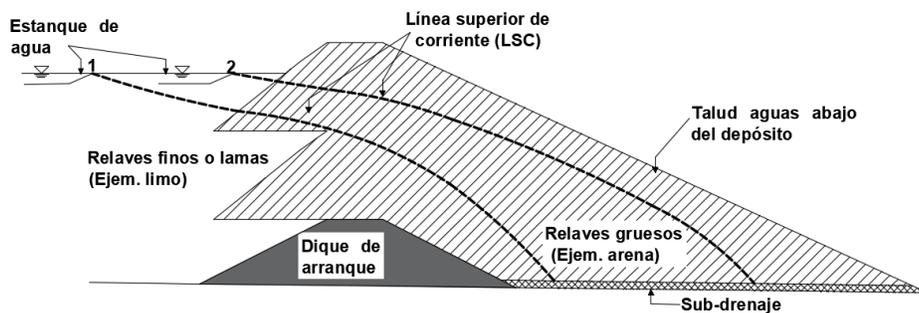


Figura 5.23: Efecto de la ubicación de los estanques de agua en la formación de la línea superior de corriente (LSC) en un depósito de relaves construido por el método de eje central (modificado de Kossov et al., 2014).

La superficie freática en un depósito debe estar muy por debajo del dique de contención con el fin de reducir las fuerzas de filtración y el fenómeno de licuación bajo eventos sísmicos. Los depósitos construidos con material a partir de la fracción gruesa de los residuos, utiliza una amplia playa con residuos finos que sirven de barrera del agua. Los métodos de construcción aguas arriba, aguas abajo y eje central, al presentar zonas con playas, la influencia del ancho de ésta para el control de flujo de agua es:

- Al presentar una playa más ancha se tiene una barrera impermeable más efectiva. Como la longitud de la trayectoria del flujo se incrementa, la línea de corriente superior es más baja.
- Con un ancho de playa más estrecho, mayor es la pérdida de filtración a través del depósito y se incrementa el nivel de la línea de corriente superior.

El control de gradientes y presiones de agua es un aspecto importante ya que afecta directamente a la estabilidad de los taludes aguas abajo y a la erosión interna. Los procedimientos de control de filtración son aplicables al control en los terraplenes y cimientos de los depósitos; sin embargo, deben modificarse correctamente para almacenar residuos en lugar de agua cerca del dique del depósito. Existen tres tipos de medidas básicas (Tabla 5.15):

Tabla 5.15: Métodos de reducción de gradientes y presiones de agua (modificado de Klohn, 1979).

Ítem	Tipo	Descripción
1	Diseño de filtros	Para evitar la tubificación y levantamiento. Los filtros son diseñados para el paso libre del agua infiltrada, pero evitando el paso de las partículas del suelo y para asegurar que el sistema de drenaje aguas arriba permanece efectivo durante la vida de la operación y no se obstruyan con residuos finos
2	Diseño de pozos de alivio	Son usados para disminuir el aumento de presiones en fundaciones permeables debajo del depósito. Estos pozos normalmente consisten en ademes perforados de 18" a 24" de diámetro y de 6" a 10" de diámetro interno de las pantallas. El espacio anular entre la perforación y la pantalla del pozo es relleno con material de filtro. Colocados usualmente al pie del talud aguas abajo por ser accesibles para mantenimiento y observación.
3	Subdrenaje	Necesario para drenaje subterráneo en los depósitos para mejorar la estabilidad física, reducir la carga hidráulica en los revestimientos, mejorar el ciclo de retorno del agua a la planta de operación y llevar monitoreos de calidad del agua.

Las filtraciones pueden manejarse mediante la aplicación de drenaje subterráneo (Figura 5.24a y 5.24b), siendo importante por las siguientes razones (Van Zyl y Robertson, 1980):

1. La estabilidad se mejora al bajar el nivel de la superficie freática a través del subdrenaje. Se forma una capa de espesor más grande de material no saturado que mejora la estabilidad estática y sísmica del depósito.
2. El reducido contenido de agua de un depósito subterráneo reducirá el movimiento de los residuos si se produce una falla en el terraplén.
3. Los sistemas de subdrenaje situados por encima del revestimiento de depósitos impermeabilizados, reducen la carga hidráulica dentro del embalse, disminuyendo la cantidad de filtración.
4. Al reducir el contenido de humedad durante la operación, se reduce la infiltración del agua a largo plazo.
5. La estabilización durante el almacenamiento de los residuos mediante deshidratación reducirá el asentamiento de la superficie del embalse.

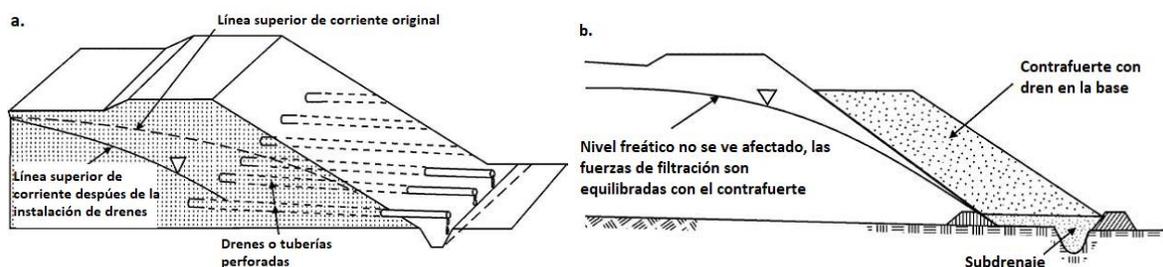


Figura 5.24: Métodos para mejorar el drenaje en taludes, a) drenes perforados y b) adición de contrafuertes con drenajes en la base (modificado de Blight, 2010).

Es necesario estimar la cantidad de flujo subterráneo presente bajo varias condiciones hidráulicas, para la investigación de problemas que envuelven la presión de agua en la construcción y para realizar los análisis de estabilidad en depósitos de residuos u otras estructuras de operaciones mineras que se encuentran sujetas al flujo de agua.

5.11 Estabilidad de taludes

El análisis de estabilidad se desarrolla para condiciones drenadas y no-drenadas. Las fuerzas de cuerpo y las cargas externas, incluyendo las de presión de agua que actúan externamente deberán ser incluidas en los análisis (Tabla 5.16).

Tabla 5.16: Análisis de estabilidad de taludes (modificado de Abramson et al., 2002; Duncan, Wright y Brandon, 2014).

Análisis	Descripción
Condiciones drenadas	<p>Cuando los cambios en las cargas son suficientemente lentos o la aplicación es extensa, a fin que el suelo alcance un estado de equilibrio y no se presente exceso de presión de agua.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad al final de la construcción, para suelos con libre drenaje se hace uso de análisis drenados que se expresan en términos de esfuerzos efectivos y las presiones de agua están basadas en el nivel freático o condiciones de flujo. • Estabilidad a largo plazo, luego de un tiempo después de la construcción, el suelo en los taludes puede presentar hinchamiento (incremento del contenido de agua) o enjutamiento (disminución del contenido de agua). La resistencia está expresada en esfuerzos efectivos y la presión de agua es estimada en las condiciones de nivel freático estático y de flujo.
Condiciones no drenadas	<p>El cambio en las cargas ocurre más rápido que el agua pueda fluir dentro o fuera del suelo. Las presiones de agua son controladas por el comportamiento del suelo en respuesta del cambio de las cargas externas.</p> <p>La descarga rápida es causada por el decrecimiento del nivel de agua adyacente al talud, a una tasa más rápida de manera que el suelo no pueda drenar. Si la descarga ocurre durante o inmediatamente después de la construcción, la resistencia al corte no-drenada usada en el análisis de descarga es la misma que la resistencia al corte no-drenada al final de la construcción.</p>
Falla progresiva	<p>Una de las hipótesis fundamentales del análisis de equilibrio límite es que la resistencia del suelo puede ser movilizada sobre un amplio rango de deformaciones. Esta hipótesis implícita surge del hecho que el análisis de equilibrio límite no proporciona información respecto a los desplazamientos y deformaciones. Este tipo de falla se da en taludes excavados en arcillas sobreconsolidadas y esquistos, particularmente rígidos y fisurados.</p>
Sísmico	<p>Los sismos afectan la estabilidad en dos maneras: primero, la aceleración produce movimiento y somete al suelo a fuerzas cíclicas variables; segundo, las deformaciones cíclicas inducidas por las cargas sísmicas dan como resultado un decremento en la resistencia al corte del suelo. En este análisis el efecto del sismo es representado por la aplicación de fuerza estática horizontal en una masa potencial de deslizamiento. Los análisis se desarrollan en términos de esfuerzos totales.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Talud existente, si el talud alcanza un equilibrio de consolidación, la resistencia al corte se puede determinar tomando una muestra representativa y someterla a ensayos triaxiales no consolidados-no drenados. El análisis se desarrolla analizando la estabilidad a corto plazo, mediante el empleo de parámetros de resistencia en términos de esfuerzos totales. • Taludes recién construidos, se simula los efectos de la consolidación y expansión futura en el laboratorio realizando ensayos consolidados-no drenados.
Consolidación parcial y etapas de construcción	<p>Los análisis de consolidación son necesarios para estimar el incremento de los esfuerzos efectivos debido a la consolidación de la cimentación bajo el peso del relleno. Los valores de esfuerzos efectivos son calculados para estimar la resistencia al corte no-drenada para uso del análisis de esfuerzo total (resistencia no drenada) o son usados directamente en análisis de esfuerzos efectivos.</p>

En la Figura 5.25 se presentan seis modos de falla que han sido registrados en los depósitos de relaves y vertederos de roca de desecho.

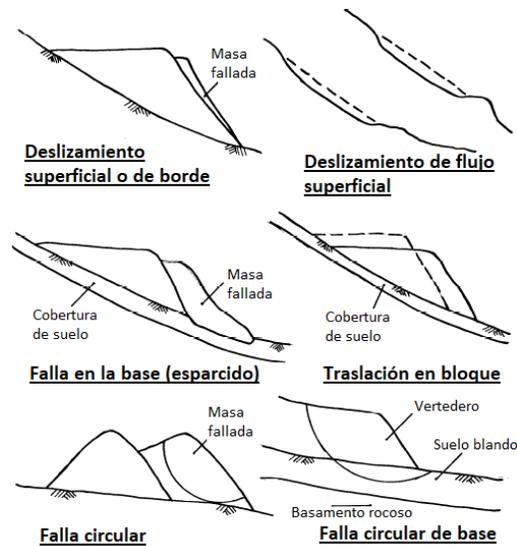


Figura 5.25: Posibles modos de falla en depósitos de roca de desecho (modificado de Robertson, 1999).

Durante el análisis de estabilidad de un depósito de relaves se debe obtener la línea superior de corriente (LSC) (Figura 5.26a 5.26b y 5.26c), para determinar las fuerzas de filtración que se presentan en un depósito. El método de construcción aguas arriba (Figura 5.26c) presenta la línea superior de corriente cerca al pie del talud aguas abajo. Esto hace que las fuerzas de filtración incidan directamente sobre esta y generen altos gradientes lo cual erosiona el pie y compromete la estabilidad del depósito. Por ello, no es recomendable utilizar este método de construcción.

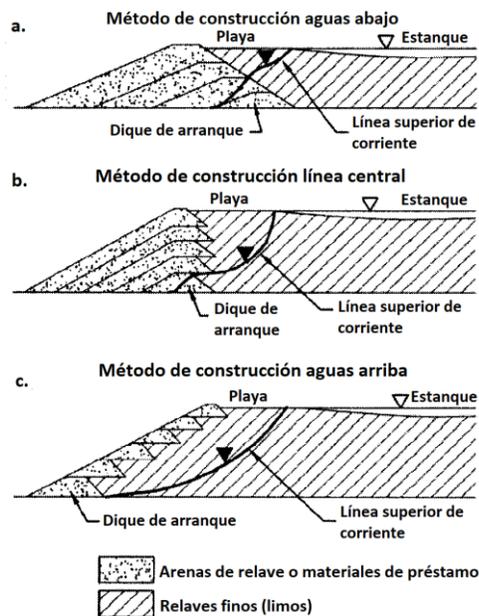


Figura 5.26: Variación de la línea superior de corriente respecto a los métodos de construcción en depósitos de relaves (modificado de Castro, 2003).

Las fuerzas de filtración junto a las fuerzas sísmicas, proporcionan un análisis más completo en la verificación de la estabilidad de taludes en los depósitos mineros.

La USACE en el año 2003, presentó un resumen de casos de análisis (Tabla 5.17) según la ubicación del talud de análisis y las condiciones de operación.

Tabla 5.17: Casos de análisis para presas de tierra y enrocamiento (USACE, 2003).

Caso de análisis	Talud
Fin de la construcción (incluyendo etapas de la construcción)	Aguas arriba y aguas abajo
Largo plazo (flujo establecido, máximo almacenamiento del embalse)	Aguas abajo
Máxima descarga del estanque	Aguas abajo
Rápida descarga	Aguas arriba
Carga sísmica	Aguas arriba y aguas abajo

6 MODOS DE FALLA EN DEPÓSITOS MINEROS Y REMEDIACIÓN

Un depósito es diseñado para almacenar los residuos mineros por un número indefinido de años, teniendo como consideraciones de diseño (Lottermoser, 2010):

1. Estabilidad a largo plazo contra la erosión y el movimiento de masas.
2. Prevención de la contaminación ambiental de las aguas subterráneas y superficiales.
3. Regreso de la zona para uso futuro del suelo.

A partir de informes realizados por diversos grupos internacionales se evaluaron las causas de accidentes ocurridos que fueron registrados, siendo las principales el diseño ineficiente y el inadecuado monitoreo y mantenimiento durante la construcción, operación y cierre del depósito.

Strachan y Caldwell en el año 2010 realizaron un resumen de las causas que provocaron las fallas de algunos depósitos de residuos mineros y que fueron presentadas en las guías USCOLD (1994), UNEP (1996), e ICOLD (2001). El resumen presentado por estos investigadores fue el siguiente:

1. La mayoría de los incidentes reportados fueron durante el periodo de construcción de grandes depósitos de residuos y, las teorías de mecánica de suelos se encontraban en desarrollo.
2. Los incidentes reportados fueron depósitos pequeños, con altura menor de 30 m.
3. Los incidentes reportados fueron asociados con terraplenes construidos con o sobre relaves mediante el método de construcción aguas arriba.
4. Varios de los incidentes reportados se asociaron con inadecuado manejo del agua (desbordamiento, filtración y erosión) o por eventos sísmicos (licuación o deformación excesiva del terraplén).

El resumen de las causas que provocaron las fallas indica que estos pudieron prevenirse con adecuado diseño de las condiciones de sitio, construcción y operación, además de una efectiva operación y monitoreo. Strachan y Caldwell en 2010, concluyeron que la falla de los depósitos de residuos es el resultado de una cadena de fallas combinadas de manera única para provocar una falla.

6.1 Algunas fallas en depósitos mineros

Los depósitos desde su creación cuentan con una gran cantidad de fallas ocurridas en diferentes países. Inadecuados diseños, malas prácticas de construcción, de operación y de cierre, son las causas principales del mal desempeño de los depósitos ante las solicitaciones que fueron expuestas. Se presenta en la Tabla 6.1 un resumen de algunas fallas ocurridas y que fueron registradas a lo largo de la historia reciente.

Tabla 6.1: Fallas ocurridas en depósitos de residuos mineros (Modificado de Blight y Fourie, 2001).

Ítem	Año	Ubicación	Residuo	Causas de falla	Volumen de flujo	Consecuencias
1	1928	Barahona, Chile	Relaves de cobre	Sismo: 8.2 (Richter)	3 x10 ⁶ m ³ relaves finos	55 muertos, graves daños ambientales
2 ¹	1937	Tlalpujahua, México	Relaves de oro	Desbordamiento por fuertes tormentas	1.5 x10 ⁶ m ³	Al menos 300 muertos
3	1961	Jupille, Bélgica	Ceniza volcánica	Remoción del material al pie del talud	100-150x10 ³ m ³ , ceniza volcánica	11 muertos, casas destruidas
4	1965	El Cobre, Chile (02 depósitos)	Relaves de cobre	Sismo: 7.5 (Richter)	1.9 x10 ⁶ m ³ , 0.5 x10 ⁶ m ³ , relaves finos	300 muertos, una villa sepultada
5	1966	Aberfan, UK	Desechos de carbón	Vertido de residuos	108 x10 ³ m ³ residuos	144 muertos, grandes daños en los alrededores
6	1970	Mufulira, Zambia	Relaves de cobre	Colapso del depósito durante operación	-	89 muertos (trabajadores de la mina)
7	1972	Buffalo Creek, USA	Desecho de carbón	Desbordamiento del depósito.	500 x10 ³ m ³ (agua más residuos)	118 muertos, 4 000 personas quedaron sin vivienda
8	1974	Bafokeng, Sudáfrica	Relaves de platino	Desbordamiento del depósito de relaves	3 x10 ⁶ m ³ de relaves finos	13 muertos, daños a las instalaciones de la mina y al medio ambiente
9	1978	Mochikoshi, Japón	Relaves de oro	Sismo: 7.0 (Richter)	80 x10 ³ m ³ de relaves finos	Graves daños ambientales
10	1985	Stava, Italia	Relaves de flourita	Falla por corte del dique de contención	190 x10 ³ m ³ relaves finos	268 muertos, graves daños ambientales y a la propiedad
11	1985	Quintette Maemot, Canadá	Desecho de carbón	Presión de agua resultando colapso por asentamiento	2.5 x10 ⁶ m ³	Graves daños ambientales, 2.5 km de río contaminado
12	1993	Saaiplass, Sudafrica (3 fallas en 3 días)	Relaves de oro	Elevados niveles freáticos en el dique tipo anillo	140 x10 ³ m ³ (fallas 1 y 2) 140 x10 ³ m ³ (fallas 3)	Pocos daños ambientales. No reportado por medios
13	1994	Merriespruit, Sudáfrica	Relaves de oro	Desbordamiento del depósito de relaves	600 x10 ³ m ³ , relaves finos	17 muertos, grandes daños al medio ambiente
14	1995	Omai, Guyana	Relaves de oro	Erosión por tubificación del dique de contención	4.2 x10 ⁶ m ³ , lodo	80 km de río devastado
15	1995	Surigao del norte, Filipinas	Relaves de oro	Falla de dique	50 x10 ³ m ³	12 muertos y contaminación de la costa
16	1996	Sgurigrad, Bulgaria	Relaves de plomo, zinc, cobre	Desbordamiento del dique de contención	220 x10 ³ m ³	107 muertos y graves daños ambientales
17	1998	Los Frailes, España	Relaves de plomo, zinc y cobre	Falla de la cimentación del depósito de relaves	4 x10 ⁶ m ³ , lodo	Graves daños ambientales
18	1999	Surigao del Norte, Filipinas	Relaves de oro	Fugas de lodos de relave por daños en tubería	700 x10 ⁶ m ³	17 casas destruidas, terrenos para agricultura devastados

Continuación de Tabla 6.1: Fallas ocurridas en depósitos de residuos mineros (Modificado de Blight y Fourie, 2001).

Ítem	Año	Ubicación	Residuo	Causas de falla	Volumen de flujo	Consecuencias
19 ²	2000	Baia Mare, Rumania	Cianuro	Desbordamiento del depósito de relaves	100 x10 ³ m ³	Contaminación de ríos, graves daños ambientales
20 ²	2008	Taoshi, China	Relaves de hierro	Licuación inducida por falla de un talud	270 x10 ³ m ³	Al menos 268 personas murieron y 1000 personas quedaron sin hogar
21 ³	2010	Kolontar, Hungría	Relaves de aluminio	Falla de la cimentación del depósito de relaves	700 x10 ³ m ³	10 muertos, 120 heridos y 8 km ² de terreno fueron inundados
22	2014	Cananea, México	Lixiviado de sulfato de cobre	Falla en el sistema de tuberías	40 x10 ³ m ³	Contaminación de 2 ríos, graves daños ambientales
23 ⁴	2014	Mount Polley, Canadá	Relaves de zinc y arsénico	Falla en la cimentación del dique de contención	25 x10 ⁶ m ³	Graves daños ambientales, contaminación de ríos y lagos
24 ⁵	2015	Fundao, Samarco, Brasil.	Relaves de cobre y de oro	Falla por licuación	30 x10 ⁶ m ³	18 muertos, comunidades destruidas, graves daños ambientales y contaminación de 500 km de río hasta alcanzar el océano

Notas: ¹Macias et al., 2015; ²Sarsby, 2010; ³Fajardo y Fuentes, 2014; ⁴Morgenstern, Vick y Van Zyl, 2015 y ⁵Morgenstern, Vick, Watts y Viotti, 2016.

Azam y Li en 2010, presentaron información de las fallas registradas desde 1910 a 2009, reportando un total de 218 casos. Estos fueron distribuidos según el modo de falla, altura del depósito, año de ocurrencia y la región donde se ubicaban.

Figura 6.1a, se tienen mayores causas de falla debido a factores climáticos, inadecuada operación y por problemas de filtración. Figura 6.1b, se observa que las fallas registradas se presentaron en alturas de depósitos entre 15 y 30 m.

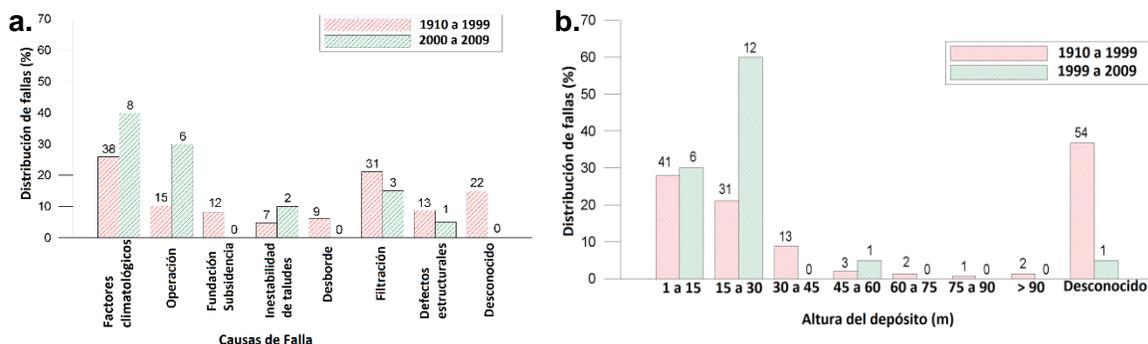


Figura 6.1: a) Distribución de fallas por causa, b) distribución de fallas por altura de depósito (Azam y Li, 2010).

La distribución de fallas por ubicación fue presentada por Strachan y Goodwin en 2015 (Figura 6.2), se observa que el país con mayor cantidad de fallas registradas en depósitos mineros es Estados Unidos, seguido de Chile y Canadá.

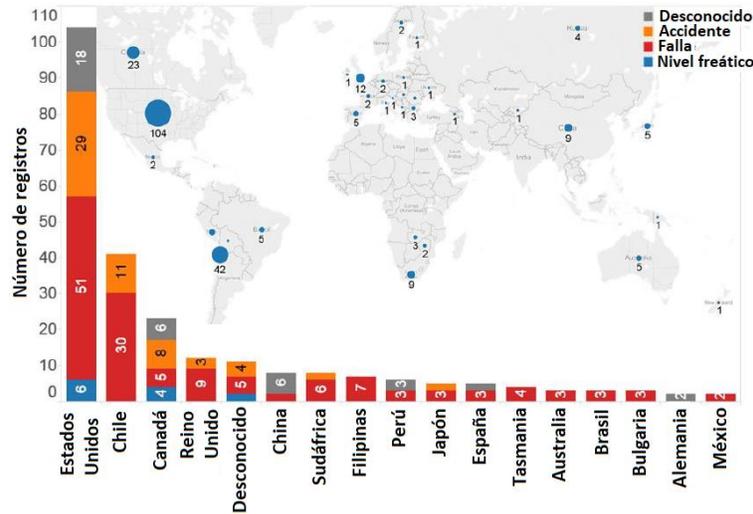


Figura 6.2: Tipos de falla y ubicación por país (Strachan y Goodwin, 2015).

Figura 6.3a, se observa que entre los años 1960 y 1980 se registraron la mayor cantidad de fallas. Norteamérica cuenta con mayor número de fallas en depósitos, pero presenta una menor tasa de ocurrencia que Sudamérica (Figura 6.3b).

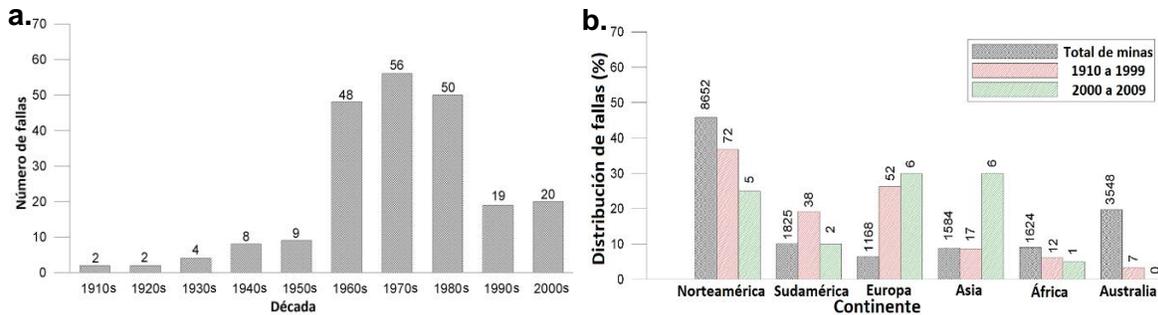


Figura 6.3: a) Fallas registradas en el tiempo, b) distribución de fallas por región (Azam y Li, 2010).

Rico et al., en el año 2008, menciona que en Europa el mayor porcentaje de incidentes se relaciona con causas meteorológicas (26% a lluvia inusual y 3% a nieve). También reporta que los incidentes debido a la licuación por sismo representan el 14% de los incidentes respecto a otras partes del mundo. Otro análisis de los datos de falla de depósitos de residuos europeos, concluyeron que el 83% de las fallas ocurrieron cuando el depósito estaba en operación, el 15% en depósitos inactivos o en cierre y solo el 2% a depósitos en cierre y mantenimiento.

ICOLD en el año 2001, presentó que la tasa de falla durante los últimos 100 años se estima en 1.2%, resultando mayor en dos órdenes de magnitud que la tasa de falla de las presas de agua convencionales que reportan una tasa de 0.01%.

A pesar de los avances respecto al control ambiental y las mejoras de las prácticas de disposición, las fallas siguieron aumentando, por ejemplo, entre 1961 y 2011 se tienen 90

incidentes mayores en el mundo, alrededor de 1.8 por año, según la información dada por Yilmaz en el año 2011 (Davies, McRoberts y Martin, 2002).

Estas fallas no pueden describirse como accidentes impredecibles. Existe una falta de capacidad de diseño, manejo inadecuado durante la construcción, operación, cierre o combinación de estos, por tanto, las fallas ocurridas son el resultado de defectos de diseño de construcción y de operaciones (Davies et al., 2002).

Las consecuencias debido a las fallas que ocurren en depósitos de residuos son:

- Daños a las comunidades, zonas de cultivo y agropecuarias, ubicadas aguas abajo del depósito.
- Posibles lesiones, morbilidad y en casos extremos, pérdida de vidas.
- Daños ambientales.
- Interrupción de la producción.
- Daño a la imagen de la empresa y la industria, impacto financiero para la mina.
- Responsabilidad legal para los encargados de la minera.

6.2 Modos de falla y trabajos de remediación

Los modos de fallas más comunes que se presentan en los depósitos corresponden a las fallas por licuación, incremento rápido de carga, falla en el suelo de cimentación, excesivos niveles de agua y altos gradientes (Tabla 6.2).

Tabla 6.2: Modos de fallas ocurridos en depósitos de residuos mineros (modificado de ICOLD, 1996).

Ítem	Tipo	Descripción
1	Licuación	Los problemas de licuación se presentan por la pérdida de resistencia al esfuerzo cortante del suelo debido al incremento súbito de la presión de agua cuando es sometido a solicitaciones sísmicas o vibraciones cercanas provocadas por equipos o uso de explosivos.
2	Incremento rápido de carga	Si un depósito de residuos mineros presenta una rápida elevación durante la etapa de operación, se presenta un incremento en la presión de agua dentro del mismo, que genera una reducción de la resistencia al esfuerzo cortante del material involucrado, afectando la estabilidad y conduciendo a la falla del depósito; esta se presenta conjuntamente con la falla del suelo de cimentación.
3	Falla del suelo de cimentación	Si la cimentación no es competente para soportar el peso del depósito se generan planos de falla a lo largo del movimiento. Las capas débiles del suelo o roca y las altas presiones de agua debajo de la base de un depósito pueden provocar fallas de corte en la cimentación, haciendo que toda el depósito se desplace hacia delante o gire hacia fuera de su posición.
4	Incremento de los niveles de agua por inadecuada operación	Si se eleva el nivel de agua dentro de un depósito y alcanza niveles críticos, entendiéndose por esto que el ancho de la playa generada entre el estanque de agua y la cresta del depósito se reduce a dimensiones que en conjunto con solicitaciones externas ya sea sísmicas, vibraciones generadas cerca de la zona del depósito o a los fuertes vientos, tales que provoquen desbordes ocasionando la ruptura, erosión y la posterior falla del depósito. El ingreso de flujos de agua no controlados, altas precipitaciones o tormentas, rápido deshielo y la inadecuada operación de los encargados de planta de las minas que emiten los residuos al depósito, pueden ocasionar el aumento de agua a niveles excesivos provocando el desborde y colapso del talud aguas abajo del depósito.
5	Altos gradientes	La filtración con altos gradientes dentro o debajo de un depósito causa erosión en el trayecto y dirección del flujo de agua, genera problemas de inestabilidad por la migración de materiales provocando erosión y posterior fallo del talud del depósito.

Se presenta algunos incidentes que ocurrieron en diversas partes del mundo:

- En Samarco-Brasil, el depósito de relaves Fundao inició su construcción en el año 2007. Este depósito alcanzó una altura de 110 m antes de la falla ocurrida en noviembre de 2015, siendo el método de construcción aguas arriba. Morgenstern, Vick, Watts y Viotti en 2016, señalaron que la falla por deslizamiento fue debido a la licuación en el material ubicado en la zona aguas arriba del depósito. El residuo alcanzó el océano atlántico (Figura 6.4a, 6.4b y 6.4c). Este depósito en el año 2010 presentó fallas por filtración generando erosión en el talud aguas del dique (Figura 6.4d).



Figura 6.4: Samarco en Brasil en el año 2015, a) ubicación de la zona que presentó licuación estática b) vista área de la falla del depósito, c) relaves que alcanzaron el océano atlántico, y d) erosión sobre el dique de arranque (Jonsson y Ljunggren, 2010; Morgenstern, Vick, Watts y Viotti, 2016; Van Zyl, 2017).

- El depósito de relaves de la mina Mount Polley, ubicado en British Columbia-Canadá, presentó una falla en el dique en el año 2014 (Figura 6.5a y 6.5b). El método de construcción inicial fue el método del eje central. Morgenstern, Vick y Van Zyl en 2015, luego de realizar diversas investigaciones llegaron a la conclusión, que la causa de la falla del depósito de residuos fue por un diseño inadecuado. Se presentaron deficiencias en la investigación geológica de la cimentación del dique perimetral tipo anillo.

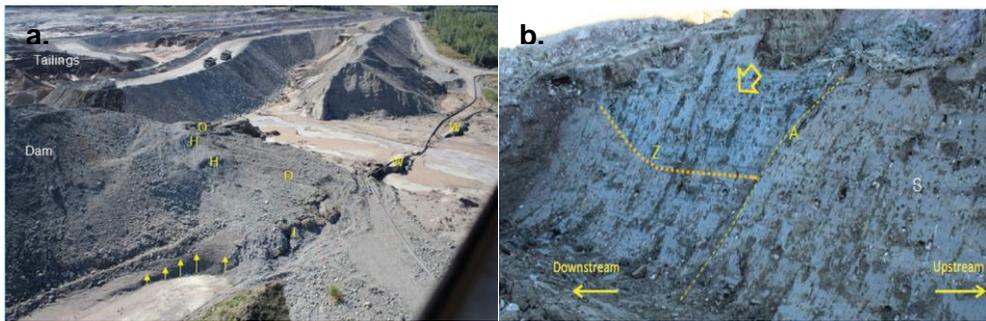


Figura 6.5: Mount Polley en Canadá en el año 2014, a) falla en la cimentación, b) superficie de corte en el núcleo del dique remanente (Morgenstern, Vick y Van Zyl, 2015).

- En abril de 1998 en Aznalcóllar-España (Figura 6.6a) y en octubre de 2010 en Kolontar-Hungría (Figura 6.6b). Los diques de contención de estos depósitos de relaves tipo embalse fallaron debido a problemas en el suelo de cimentación y a la infiltración de agua que atravesaba los diques.



Figura 6.6: Rotura de diques de los depósitos de relaves en a) Aznalcóllar en España en el año 1998 y b) Kolontar en Hungría en el año 2010 (Fajardo y Fuentes, 2014).

- En mayo de 1937, el depósito de relaves “Los Cedros” (Figura 6.7a y 6.7b) ubicado en Tlalpujahua estado de Michoacán en México, presentó falla por desbordamiento debido a las intensas lluvias que ocurrieron durante una semana. Esto trajo como consecuencia la erosión de la superficie del talud aguas abajo del dique de contención, generando inestabilidad por la pérdida de soporte al pie del talud.

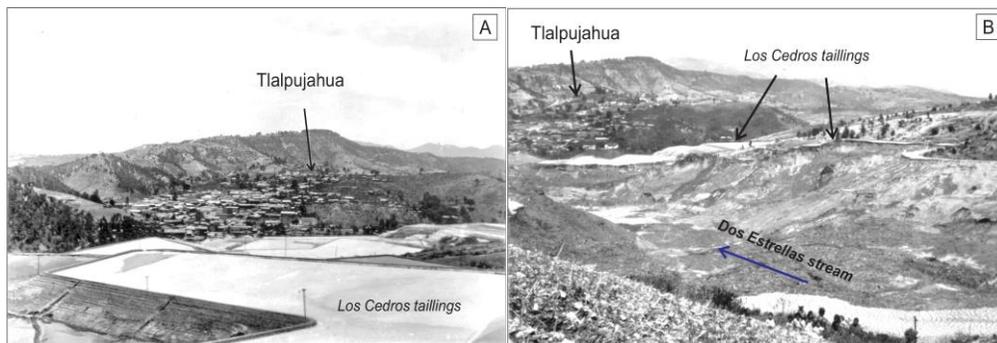


Figura 6.7: Depósito de relaves “Los Cedros” en Tlalpujahua, año 1937, a) antes, y b) después de la falla (Macías, 2015).

Los modos de falla que se presentaron responden a fallas en el diseño, deficiente caracterización del material involucrado en el depósito, inexperiencia, ocurrencia de eventos extremos como lluvias, tormentas o sismos que no considerados. Estas deficiencias, aunadas a la mala operación durante la construcción, operación y cierre, generaron fallas que en algunos casos provocaron graves daños ambientales y la pérdida de vidas.

ICOLD en 1996, detalla una serie de trabajos de reparación y remediación de daños ocasionados por factores humanos y naturales (Tabla 6.3). Estos trabajos de reparación dependerán del diseño del sistema, causa, naturaleza y de la magnitud del daño.

Tabla 6.3: Trabajos de remediación según el modo de falla en depósitos de residuos mineros (modificado de ICOLD, 1996; Abramson et al., 2002).

Tipo	Descripción
Desborde	Si no ha ocurrido un fallo catastrófico, las obras de reparación consistirán en reemplazar el material removido de la cresta y del talud aguas abajo como resultado de la erosión, además, de la reparación de las obras auxiliares dañadas. El material a emplear en la etapa de reparación, debe contar con propiedades adecuadas como resistencia, densidad, permeabilidad y durabilidad. Se puede considerar trabajos como la construcción de bermas o muros de contención, gaviones o el uso de geosintéticos con el fin de proporcionar resistencia necesaria a cualquier solicitación.
Inestabilidad de taludes	Las fuerzas resistentes pueden ser incrementadas por: <ol style="list-style-type: none"> 1. Mediante drenaje que incrementa la resistencia al corte del suelo. 2. Eliminación de los estratos débiles u otras zonas potenciales de falla. 3. Construcción de estructuras de retención u otras de soporte. 4. Colocación de reforzamiento en campo. 5. Tratamiento químico para incrementar la resistencia al corte del suelo. Un resumen de las medidas de remediación según el tipo de inestabilidad: <ul style="list-style-type: none"> • Profunda: modificar la sección del talud, tender el talud aguas abajo, adicionar bermas de contención, reducción de la altura de la corona, instalación de drenajes horizontales, pozos a pie de talud, pozos, construcción de estructuras de retención. • Superficial: abatir el nivel freático, modificar el talud, construcción de drenes en el talud, reforzar el talud con uso de contrafuertes (reellenos con suelo y roca, bermas de contención, dentellones, terraplenes estabilizados mecánicamente), remover y reemplazar el material no competente, uso de vegetación, estabilización química y geosintéticos.
Erosión interna	Es el resultado de los defectos que se presentan en el interior de un depósito, como son el drenaje defectuoso en el control de filtración y el diseño deficiente de los conductos o filtros que no permiten el drenaje. La detección es difícil y el desarrollo de fallas por tubificación es más rápida que las medidas de remediación a implementar. Cuando se pueden realizar trabajos de remediación, la primera acción será reducir los niveles de aguas o lodos almacenados en el depósito. Si la fuente de filtración que causa erosión se ubica en el talud aguas arriba, el material deberá ser reemplazado para sellar la zona afectada. Otro trabajo de remediación es colocar material de drenaje en el talud aguas abajo, como, filtros invertidos, que controlan los gradientes de salida y reducen el riesgo de erosión.
Erosión externa	La erosión externa debido a vientos y a los efectos de las tormentas pueden prevenirse cubriendo la superficie expuesta con coberturas gruesas (suelo o geosintéticos) y no erosionables, con estabilización química o con el empleo de vegetación.
Daños por sismos	Consisten en flujo de masas por licuación, asentamientos y desplazamientos con agrietamientos o fracturas en la dirección paralela al eje de la corona del dique del depósito, además, de posibles daños en los sistemas de drenaje y obras estructurales. Es apropiado revisar el diseño general del sistema y ejecutar obras para asegurar que funcionará satisfactoriamente durante y después de cualquier evento sísmico.
Daños en el sistema de decantación	En el caso de colapso del conducto de decantación, las medidas de emergencia pueden incluir la puesta en marcha de un sistema de bombeo o la creación de un vertedero temporal.
Contaminación de aguas subterráneas	Es necesario tomar medidas especiales de control de la contaminación. Un requisito previo para el diseño de tales medidas es una comprensión completa de la hidrogeología del sitio. Esto implica la instalación y monitoreo de piezómetros para determinar direcciones de flujo, gradientes hidráulicos y características del acuífero.

Los tipos de drenajes se pueden diferenciar de dos formas y estarán en función de la ubicación del cuerpo de agua a medir:

- Drenaje superficial, esencial para el tratamiento de cualquier talud inestable. El objetivo es asegurar que la escorrentía superficial sea derivada y no se filtre dentro del talud.
- Subdrenaje, para cualquier superficie de deslizamiento que pasa por debajo de la superficie freática. Estos pueden ser: capas drenantes (dren blanket), trincheras, drenes horizontales, drenes de alivio y túneles o galerías de drenaje (galerías filtrantes).

Para trabajos de ampliación o recrecimiento puede ser necesario instalar medidas adicionales de drenaje en la superficie existente del depósito. Esto puede hacerse mediante:

- Instalación de drenajes de tubería perforada en el talud externo existente.
- Construcción de drenes adicionales delante del pie del talud existente y luego reconvirmando el talud aguas arriba sobre las nuevas medidas del drenaje.

Como medidas de control se pueden considerar dos tipos: barreras de filtración y sistemas de retorno. Las barreras sirven para prevenir la filtración e incluirían trincheras cortadas, paredes y cortinas de lechada. Es importante al decidir si se deben implementar tales medidas para considerar no sólo si lograrían el efecto requerido en el control de la contaminación de las aguas subterráneas, sino también cualquier efecto adverso que las mismas tengan sobre la estabilidad con respecto a las presiones de agua debajo de los depósitos. En algunos casos es apropiado instalar sistemas de retorno que consisten en canales o pozos colectores en lugar de barreras de filtración, estos sistemas captan los flujos de filtración permitiendo que el agua contaminada sea retenida para su tratamiento o eliminada de manera que no afecte el medio ambiente.

También puede ser necesario tender los taludes, construir contrafuertes con residuos u otros residuos permeables como relaves gruesos o rocas, o materiales de préstamo.

En las Figuras 6.8a y 6.8b, se presenta un caso de remediación en un depósito de residuos que se ubica adyacente a un río en Perú. Trabajos de estabilización de taludes como el tendido de éstos, implementación de sistemas de drenaje superficial y colocación de coberturas vegetales, permitieron estabilizar físicamente el depósito de relaves.



Figura 6.8: Depósito de relaves Tablachaca en Perú, a) antes de la remediación y b) después de estabilización de taludes y colocación de cobertura vegetal (Cacciuttolo y Tabra, 2015).

Antes de iniciar cualquier trabajo de remediación es indispensable conocer las causas que provocaron la inestabilidad. Se deberá realizar una investigación a detalle para determinar la causa y proporcionar información para el diseño de las obras de remediación. Estos trabajos correctivos permanentes tendrían que ser objeto de un diseño de ingeniería a mayor detalle, teniendo en cuenta la viabilidad y rentabilidad en su ejecución.

Además de los modos de fallas presentados se menciona que el factor humano puede conducir a la falla de un depósito. La falta de estrategias de revisión, no hacer uso del método observacional, inadecuada supervisión, y, por último, la falta de conocimiento del comportamiento de los residuos, traerán consigo condiciones desfavorables en la estabilidad con posteriores daños al ser humano y al medio ambiente.

7 ASPECTOS DE CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y DE CIERRE DE DEPÓSITOS MINEROS

Los aspectos técnicos de construcción, operación y de cierre en los depósitos de residuos involucran aquellas actividades que se presentan durante la etapa operacional y de cierre. El monitoreo de la calidad del agua, sedimentos y vida acuática es una importante herramienta para controlar y evaluar un cierre que sea sostenible con el medio ambiente.

Es indispensable llevar a cabo una operación cuidadosa e inteligente. El uso de un manual de operaciones debe incluir en su contenido el que "hacer" y "no hacer" (Blight y Fourier, 2003). Además, describir aquellas situaciones peligrosas, procedimientos de emergencia y sistemas de alerta entre otras directivas que ayuden a un adecuado manejo del depósito. La Asociación Minera de Canadá en el año 2011 presenta un resumen de los procedimientos de operación en depósitos de residuos mineros (Tabla 7.1).

Tabla 7.1: Procedimientos de operación de los depósitos mineros (modificado de Asociación Minera de Canadá, 2011).

Almacenamiento de residuos mineros	
Seguridad del depósito. Inicio de la elevación del depósito. Capacidad de almacenamiento de sólidos. Reciclaje de agua.	Requerimientos de tratamiento de agua. Construcción de celdas, espigas, playa. Compactación.
Instrucciones de operación de sistemas hidráulicos (tuberías y bombas)	
Reubicación de una línea de relaves. Línea de presión. Densidad de pulpa. Rotación de tuberías. Aberturas de válvulas.	Rotura de válvula. Adecuado mantenimiento para evitar el desgaste o congelamiento de líneas o bombas.
Respuesta a las desviaciones en las propiedades físicas, químicas o mineralógicas del diseño. Respuesta a condiciones de operación inusuales, como condiciones severas de invierno, periodos de lluvia alta, sequía y viento fuerte. Funciones mecánicas, como rotación y reubicación de líneas y aberturas de válvulas.	

7.1 Monitoreo y control de calidad en depósitos mineros

El objetivo de un programa de control y monitoreo es recopilar información en campo que permita evaluar estructuras para que alcancen los niveles requeridos de servicio, seguridad en el trabajo, productividad y desempeño durante la vida útil de la mina. La importancia de los controles y monitoreos geotécnicos se ocupan tanto de la estabilidad del suelo y de la roca, como de los problemas de inestabilidad que resultan del desarrollo de la mina, de la extracción de los minerales de beneficio y de la disposición de los residuos mineros.

El monitoreo de rutina y mantenimiento preventivo son de importancia para asegurar el buen desempeño de un depósito. El mantenimiento preventivo se basa en la observación anticipada de potenciales puntos críticos, que pueden mantener la estabilidad de la estructura, control de filtración y mayor manejo de los costos asociados (Vick, 1990). La instrumentación permite interpretar de forma aproximada la extensión del problema, además de ser usado para desarrollar las tendencias en el comportamiento del material depositado.

Las variables físicas y químicas a medir en un depósito pueden incluir la precipitación y la temperatura del ambiente, flujo, concentraciones de sedimentos suspendidos, velocidad y dirección del viento, niveles de polvo, pH del agua y concentración de materiales pesados

disueltos y, demanda biológica de oxígeno (DBO). Una lista específica de estos u otros parámetros dependerá del proyecto en particular y del entorno receptor. Los criterios de selección se dividen en tres categorías (Salomons y Förstner, 1988):

1. Criterios significativos. Algunos elementos del sistema ambiental deben ser monitoreados debido a algún valor especial asociado a ellos. Otro criterio de significación es la representatividad, por lo que un parámetro ambiental particular representa adecuadamente una parte del sistema natural, como un grupo de características químicas, un hábitat o una respuesta del sistema.
2. Criterios de viabilidad. Puede que no sea técnicamente o logísticamente factible monitorear todos los elementos del sistema ambiental y es necesaria una mayor selección.
3. Criterios técnicos. Los parámetros ambientales que son significativos y que son factibles de monitorear deben evaluarse con un conjunto adicional de criterios. Las predicciones para cualquier proyecto dependen en gran medida de la experiencia acumulada, obtenida durante el trabajo previo en otros lugares y reportada en la literatura técnica. Es necesario que los datos que se recopilen sean comparables con los disponibles en otros lugares.

Los análisis de estabilidad de un depósito determinan los modos de falla más críticos y los parámetros que rigen. El monitoreo es esencial para prevenir las fallas y contaminación ambiental. Las condiciones específicas de sitio requieren programas de monitoreo que deben abordar:

- Desempeño del depósito, incluye mediciones de la tasa de llenado, consolidación, distribución granulométrica, balance hídrico y concentraciones químicas del proceso como, por ejemplo, el cianuro.
- Estabilidad del depósito, establece el nivel de la superficie freática en el terraplén y los residuos, así como la estabilidad de los taludes y la presión de agua presente.
- Aspectos ambientales, incluye: observaciones meteorológicas, mediciones de los niveles de radioactividad, investigaciones de la química y mineralogía de residuos, realización de pruebas geoquímicas estáticas y cinéticas para el potencial de generación de AMD, análisis químicos de aguas subterráneas, superficiales y de infiltración, sedimentos de corrientes aguas abajo y partículas de polvo.

El monitoreo de aguas subterráneas es una parte integral del monitoreo de residuos y permite una evaluación de la filtración a los acuíferos (Robertson, 1994). La instrumentación es empleada para medir y monitorear las condiciones de campo que están sometidas a cambios como:

- La instalación de piezómetros para monitorear el nivel de agua subterránea y presiones de agua, dentro y fuera del depósito.
- Instalación de inclinómetros e inspecciones visuales, para monitorear deformaciones, desplazamientos, movimientos superficiales del suelo de cimentación y del depósito
- Muestreo de calidad de aguas superficiales y subterráneas tanto aguas arriba como aguas abajo del depósito.
- La prueba y el seguimiento de las estrategias y planes de cierre, incluidos los tratamientos y coberturas en taludes.

Los trabajos realizados durante las actividades de construcción, operación y cierre, deben garantizar que el depósito de residuos fue construido por un contratista competente, con un nivel apropiado de supervisión y control de calidad de los materiales de construcción, para

demostrar que las actividades están de acuerdo con los planos y especificaciones de diseño del depósito. El aseguramiento y el control de la calidad son actividades que se encargan de verificar, controlar, comparar y mejorar los trabajos realizados en una operación minera. En la Tabla 7.2 se presenta un breve resumen de los controles de calidad a realizar:

Tabla 7.2: Control de calidad de la construcción, operación y de cierre en depósitos mineros.

Ítem	Etapas	Tipo	Descripción
1	Construcción	Vertederos	<ul style="list-style-type: none"> • En las actividades de explotación se deberán controlar las dimensiones de las rocas que serán extraídas durante los trabajos de voladura. Esta operación será importante tanto para los materiales a trasladar a planta o a los vertederos. • Durante la habilitación del área designada se deben verificar que esta no cuente con raíces o coberturas vegetales. • En caso de requerir impermeabilizar la zona de almacenamiento, se deben llevar a cabo controles que aseguren que el material empleado cumpla con las especificaciones de diseño. • Se deberán verificar los trabajos de instalación de piezómetros y elementos de medición de desplazamientos o asentamientos. • Los sistemas de subdrenaje deberán contar con materiales que cumplan las especificaciones de diseño y el proceso constructivo.
		Depósitos de relaves	<ul style="list-style-type: none"> • Durante la construcción de terraplenes con materiales de préstamo, estos deberán cumplir con las especificaciones que permitan alcanzar las condiciones de resistencia y de drenaje requerido. • Se deberá verificar mediante controles de compactación las capas de relleno según el contenido de humedad y peso volumétrico especificado en el diseño. • En el empleo de geosintéticos se realizará la inspección y supervisión de los materiales y trabajos realizados durante la instalación y del proceso de fabricación de los mismos.
2	Operación	Vertederos	<ul style="list-style-type: none"> • Los trabajos de colocación y conformación de las rocas de desecho, deberán ser supervisados. Además deberá efectuarse la revisión de los equipos empleados durante los trabajos de disposición.
		Depósitos de relaves	<ul style="list-style-type: none"> • Se verificará la adecuada operación del estanque de decantación y la recuperación eficiente del agua para maximizar la estabilidad, así como el control periódico de los pozos de monitoreo. • Las estaciones hidrometeorológicas y estaciones de monitoreo sísmico que hayan sido instaladas cerca del depósito deberán estar debidamente calibradas y en correcto funcionamiento. • Monitoreo de las deformaciones o desplazamientos durante toda la etapa de operación, así como la medición del control de niveles y presiones del agua. • Control de los trabajos de conformación y compactación de las actividades de disposición de los residuos. • Control de calidad a los materiales empleados en la etapa de operación.
3	En cierre	Vertederos	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo ambiental de la calidad del agua, suelo y aire. • Monitoreo periódico de las deformaciones y desplazamientos ocurridos en el depósito.
		Depósitos de relaves	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo ambiental de la calidad del agua, suelo y aire. • Monitoreo periódico de las deformaciones y desplazamientos ocurridos en el depósito.

Adicional a las actividades de control de calidad expuestas en la Tabla 7.2 se deberán proporcionar:

- Un registro detallado y una descripción de aspectos geotécnicos críticos, tales como la preparación de la cimentación, tratamiento de grietas o trabajos de compactación. Este registro ayuda en el diseño y la construcción de obras correctivas.

- Esquemas que representen los trabajos de construcción detallados, especialmente donde pueden haber ocurrido cambios de diseño durante la construcción y ayudar a proporcionar más detalles y dimensiones para trabajos correctivos. Para que éstos no afecten a la integridad de las estructuras existentes y brinden detalles para los análisis retrospectivos que estos requieren.

Los informes de monitoreo deben prepararse según el plan propuesto por la operación minera, y deben ser accesibles, fáciles de entender y transparentes para las partes interesadas.

Inspección visual y topográfica del dique de contención del depósito

Se realiza mediante recorridos en superficie de los depósitos. La inspección visual y los levantamientos topográficos en campo tienen como objetivo identificar y obtener información de la superficie. Identificación de grietas, abultamiento, depresiones, sumideros, vegetación, erosión de talud, niveles de agua, filtración, nuevas áreas y cambios de áreas de filtración, pendiente de la playa. Así como, la clasificación de posibles observaciones que serían consistentes con el comportamiento esperado. Información como la geometría del depósito que comprenden altura, ancho de la cresta del dique, altura del bordo libre ángulo de inclinación de los taludes aguas abajo y aguas arriba.

Monitoreo y control en la disposición de residuos

El control en la descarga y almacenamiento de los residuos corresponden al peso volumétrico de campo, contenido de humedad y grado de compactación, siendo variable por el método de construcción utilizado (Orozco, 2011, Villavicencio, 2013).

- Clasificación, se recomienda la disposición de arenas para la construcción del dique de retención con un porcentaje de finos entre 10% y 25%. El último depende de un equilibrio entre las propiedades geotécnicas de los materiales y los costos asociados con el proceso de la estación ciclónica.
- Grado de compactación, se considera aceptable una densidad de compactación del 95% de la máxima densidad seca determinada del ensaye Proctor Estándar, para estructuras como los depósitos de relaves o vertederos de roca de desecho donde ciertos niveles de deformación son aceptables (Villavicencio, 2013). Para controlar el grado de compactación de las capas de arena de relaves, se pueden emplear: método de cono de arena y método de reemplazo de agua. En Chile se tiene implementado los ensayos estandarizados como el penetrómetro de cono dinámico pesado y de penetración dinámica ligera para verificación del grado de compactación en profundidad.

Monitoreo y control de desplazamiento y deformación

El monitoreo de la deformación y desplazamiento es para seguir la respuesta de un depósito a la carga continua o por eventos sísmicos. Estas deformaciones son normales y la dificultad consiste en distinguir una deformación normal de una crítica. Las técnicas de monitoreo se resumen en:

1. Topografía (nivelación, medición de distancia, colimación).
2. Fotogrametría e imágenes satelitales.
3. Extensómetros (superficial, subterráneo).
4. Inclínómetros (superficiales o subterráneos, en perforaciones).
5. Emisiones acústicas.
6. Láser (LIDAR, detección y localización de imágenes por láser).
7. Celdas de asentamiento.

El monitoreo topográfico es el de mayor aplicación y menor costo para obtener desplazamientos superficiales horizontales o verticales, movimientos de aperturas o grietas, y así verificar el comportamiento de los depósitos (Figura 7.1).



Figura 7.1: Monitoreo de desplazamiento con equipo topográfico (Nyrstar, 2017).

En la Tabla 7.3 se presentan algunos tipos de medidores de deformación y desplazamiento que son aplicables en terraplenes de suelo o roca. Estos son empleados en presas de tierra y en depósitos mineros.

Tabla 7.3: Tipos de medidores de deformación y desplazamiento (Abramson et al., 2002)

Ítem	Tipo	Descripción
1	Inclínómetros	Mide la inclinación de un ademe dentro de una perforación. Esto permite obtener desplazamientos verticales y horizontales. Consta de tres partes: <ul style="list-style-type: none"> •Carcasa o ademe, especial que se deforma bajo la influencia de movimiento de terreno. •Unidad de sensor que mide las inclinaciones de forma continua de la carcasa. •Un adquisidor de datos que permita almacenar la información.
2	Indicador de planos de corte	Son dispositivos instalados para medir la deformación perpendicular en una perforación o en una tubería previamente instalada. Las típicas aplicaciones son para determinar la profundidad y extensión de las zonas de deslizamientos en taludes naturales y excavados.
3	Extensómetros	Es un arreglo que permite monitorear la deformación perpendicular en un eje de una perforación.

Medición del nivel freático y nivel del flujo subterráneo de agua

El empleo de piezómetros es de vital importancia para el control de estabilidad estática y sísmica del depósito, así como para verificar el nivel de las aguas subterráneas y evitar problemas de contaminación. La información recopilada de las lecturas realizadas en los depósitos es utilizada para el análisis de estabilidad en esfuerzos efectivos al observar la variación de presión y nivel de agua, debido a que la saturación

de dichos materiales presenta un riesgo significativo a la inestabilidad mecánica y a la licuación. También se puede aplicar para realizar controles de los estándares de calidad a los cuerpos de agua circundantes del depósito de residuos. El monitoreo debe realizarse mediante la instalación de piezómetros en el perímetro del dique. El funcionamiento y uso de piezómetros dentro de un depósito de relaves (Martin, 1999; Abramson et al., 2002):

- Los pozos de observación permiten identificar los niveles de aguas dentro de un depósito.
- Los piezómetros de tubo abierto se pueden instalar en lugar de piezómetros de presión en los depósitos. Estos piezómetros también pueden instalarse en los estratos de cimentación si es que su permeabilidad es mayor que los residuos.
- Los piezómetros neumáticos, eléctricos o de cuerda vibrante, se utilizan para medir las presiones de agua y los gradientes de filtración (componentes horizontales y verticales). También se pueden usar para evaluar los grados de consolidación dentro de un depósito y para determinar si el depósito está respondiendo de forma drenada o no drenada a un aumento continuo de carga.

Actualmente se emplean sensores electrónicos que permiten medir la presión de agua, además de parámetros ambientales como temperatura, conductividad eléctrica y pH. La elección del piezómetro depende del tipo de predicción de la presión de agua, accesos para lecturas, vida útil y tiempo de respuesta, con el objetivo de identificar o predecir los cambios que sean críticos o perjudiciales para la estabilidad del depósito, como las presiones de agua, filtraciones, movimientos y presiones totales (Abramson et al., 2002). Las primeras actividades a realizar son localizar la superficie freática y evaluar la resistencia al corte de los residuos mineros depositados. Los perfiles de resistencia deben extenderse a través de toda la altura del almacenamiento y, en lo posible, en el estrato de la cimentación. Se presenta un resumen de instrumentos usados en la medición del nivel y presión de agua (Tabla 7.4).

Tabla 7.4: Tipos de piezómetros (modificado de Abramson et al., 2002).

Ítem	Tipo	Descripción
1	Pozo de observación	Consiste en una tubería de sección perforada colocada en una perforación rellenada con arena. Debe estar sellada en la superficie para evitar la escorrentía superficial hacia la perforación. Se emplea un limnómetro para medir el nivel de agua, además de permitir obtener muestras para ser analizadas químicamente (Figura 7.1a).
2	Piezómetro de tubo abierto	Es una tubería con un filtro. Los elementos de filtro requieren sellarse para que la respuesta sea solo de presiones de agua alrededor del elemento de filtro y no las presiones de agua a otras elevaciones (Figura 7.1b).
3	Piezómetros neumáticos	Consiste en una punta cubierta con diafragma flexible que controla una válvula neumática. Esta válvula opera cuando la presión en el sistema neumático iguala la presión en el piezómetro. El piezómetro es instalado similar al piezómetro de tubo abierto (Figura 7.1c).
4	Piezómetro de cuerda vibrante	Consiste en un diafragma metálico que se separa cuando se tiene presión de agua dentro del sistema. Se tiene una cuerda tensionada que está en el punto medio del diafragma. La deflexión del diafragma causa cambios en la tensión de la cuerda; esta variación medida es registrada y convertida en presión según el tipo de sensor empleado (Figura 7.1d).

Los cuatro tipos de piezómetro de mayor aplicación en la instrumentación de los depósitos de residuos mineros se presentan en la Figura 7.2.

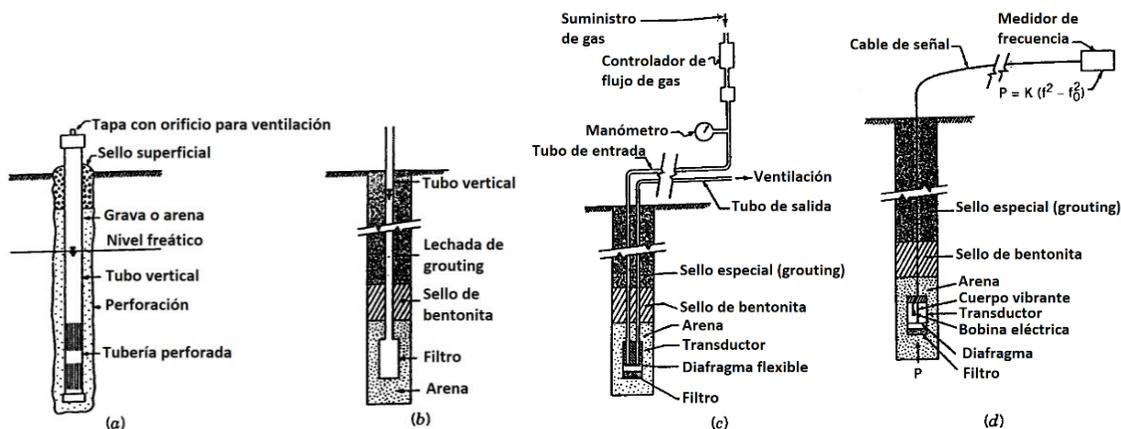


Figura 7.2: Piezómetros de, a) pozo de observación, b) tubo abierto, c) neumático, y d) cuerda vibrante (modificado de Abramson et al., 2002).

Los sistemas de monitoreo piezométrico apropiados dependerán de las variaciones y las condiciones específicas del depósito. En la Figura 7.3 se observa una red de monitoreo piezométrico en un depósito construido por el método de eje central. Se observa la ubicación de los piezómetros neumáticos o eléctricos ubicados sobre el talud y el empleo de los piezómetros abiertos a lo largo de la sección del depósito.

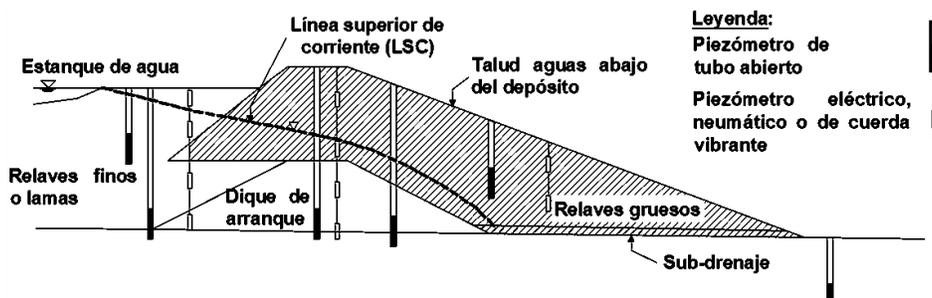


Figura 7.3: Sección de un esquema de monitoreo piezométrico en un depósito construido con el método del eje central (modificado de Martin et al., 2002)

La frecuencia de registro de niveles y presión de agua dependerán de los planes de monitoreo de cada operación minera. Actualmente, se está haciendo uso de sensores eléctricos y electrónicos que registran continuamente las variaciones presentadas en los piezómetros abiertos. Estos proporcionan mayores registros que permiten monitorear y predecir cambios que provoquen inestabilidad en los depósitos.

Monitoreo sísmico

En el sector minero a gran escala es común el monitoreo sísmico del dique y el área del depósito, empleando acelerómetros para registrar las aceleraciones del terreno y así evaluar y analizar el comportamiento mecánico y dinámico del mismo. La instalación de acelerógrafos, permitirán a la operación minera registrar información que sirva para complementar los análisis durante la etapa de operación, así como, suministrar datos reales en los análisis y almacenar el historial de aceleraciones registradas del depósito.

Otros parámetros a monitorear son las precipitaciones y la temperatura ambiente, mediante las estaciones meteorológicas.

El personal a cargo de la operación del depósito debe ser capaz de desarrollar, adaptar y actualizar los procedimientos de construcción para asegurar el correcto funcionamiento mecánico de los residuos. Además, el personal tiene que estar enterado de la operación con residuos incluyendo los monitoreos, por medio de información y capacitación continua, de acuerdo con las especificaciones de diseño, los requisitos de la institución reguladora y las reglamentaciones vigentes.

Un adecuado manejo en la operación de un depósito demostrará una responsabilidad operacional, con un conocimiento profundo de los objetivos de diseño, operación y cierre. Deben entenderse claramente las implicaciones de no operar de acuerdo con la intención del diseño y los criterios de diseño. Por tanto, es indispensable contar con un manual de operación de relaves para cada instalación del depósito, cuyo objetivo principal es guiar y ayudar a los operadores con las labores de operación diaria, así como con la planificación anticipada y el mantenimiento.

7.2 Cierre de depósitos mineros

En algunos casos los relaves y las rocas de desecho no contienen ninguna sustancia que sea nociva al medio ambiente, para esto, durante la fase de cierre, la mina se asegurará de que el agua se drene del estanque de residuos para salvaguardar la estabilidad física. Se realizarán trabajos de movimiento de tierra para accesos a la maquinaria y se prepararán estanques y pilas que serán cubiertos con suelo y vegetación.

En otros casos, las técnicas de procesamiento de minerales pueden desarrollarse de manera que se puedan extraer más minerales de manera rentable. Estos residuos deben estar accesibles para una posible explotación futura. En general, los principales problemas que se consideran para la recuperación y el cierre de las instalaciones son de largo plazo:

- Estabilidad física del depósito,
- Estabilidad química de relaves y roca de desecho, y
- Uso sucesivo del suelo.

El empleo de equipos de monitoreo estará en función del tipo de residuo, variables de medición, método de construcción y altura del depósito. Para detectar la posible contaminación en una fase temprana y en consecuencia tomar las medidas correctivas adecuadas antes de que se propague la contaminación, es necesario realizar la monitorización del suelo, agua y aire en relación con las sustancias peligrosas. La frecuencia de monitoreo podrá tomarse en consideración del tipo de medidas preventivas y la amplitud e incidencia de la supervisión y de las normas o reglamentos.

El monitoreo debe estar alineado con las normativas ambientales vigentes de agua, suelo y aire con el objeto de cumplir con los reglamentos y normas de la región o país donde se ubica la operación minera. En caso de estar financiado por alguna institución debe cumplir las condiciones, contratos y normativas particulares del sitio.

8 ASPECTOS AMBIENTALES

Los problemas de contaminación ambiental se evidencian en los efectos de los depósitos cercanos en áreas habitadas, por ejemplo, los efectos erosivos del viento, pueden provocar la ingestión directa de partículas como el plomo. Un problema más severo es el drenaje ácido de mina (AMD) que pueden estar contenidos en los relaves, roca de desecho y superficies expuestas. En este capítulo se tratan los aspectos ambientales involucrados durante el diseño, operación y cierre de los depósitos mineros.

8.1 Aspectos ambientales de diseño

La evaluación del impacto ambiental debe integrarse al proceso de planeación para decidir las mejores alternativas para realizar un proyecto o actividad que se desee llevar a cabo, siendo esto aplicable para el análisis, diseño y construcción de proyectos relacionados a las operaciones mineras (Jaime, 2003). Cuando se analiza las estrategias disponibles para el manejo ambiental (Tabla 8.1), se hace evidente jerarquizar las responsabilidades a largo plazo o a los riesgos asociados con la gestión de residuos y la contaminación, asociando cada uno los costos requeridos para cada actividad a realizar (Cheremisinoff, 2003):

Tabla 8.1: Estrategias para manejo de residuos (modificado de Cheremisinoff, 2003).

Ítem	Tipo	Descripción
1	Prevención	Esta estrategia propone en primer lugar reducir la cantidad de residuos.
2	Reciclaje, recuperación de recursos y reutilización en energía (R ³ WE)	La recuperación de ciertos residuos para su reutilización (conocida como recuperación de recursos) y la conversión de ciertos tipos de residuos en energía útil como el calor, la electricidad, entre otros. Son estrategias que recuperan y compensan los costos de operación general de residuos.
3	Tratamiento	Cuando los desechos no pueden evitarse o minimizarse mediante la reutilización o el reciclaje, entonces se deben seguir estrategias dirigidas a reducir volúmenes y/o cantidad de contaminantes. Las tecnologías de tratamiento son procesos que se centran en la estabilización de los desechos, la reducción de la toxicidad, la reducción del volumen antes de su eliminación definitiva, o, en algunos casos, la creación de subproductos con aplicaciones limitadas.
4	Disposición	Las prácticas para disposición de desechos están integradas en las estrategias de gestión ambiental de todos los países, son parte integral de la mayoría de las operaciones de fabricación y con frecuencia están entre los componentes de costos directos más altos.

Las estrategias para el manejo ambiental de residuos están relacionadas con los costos y riesgos durante su desarrollo.

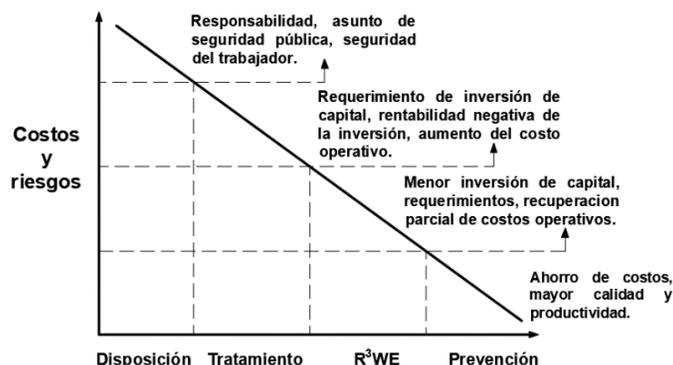


Figura 8.1: Estrategia de manejo de contaminantes y residuos (Cheremisinoff, 2003).

En la Figura 8.1 se observa que los costos y riesgos que se presentan en la disposición de residuos alcanzan mayores valores que en la actividad de prevención. Desde el punto de vista económico, es la estrategia menos deseable y que puede ser abordada directamente por la minimización de residuos y otras prácticas complementarias. La reducción de residuos mineros involucra actividades que comprenden trabajos como el control de contaminantes y la reducción del volumen de residuos (Figura 8.2).

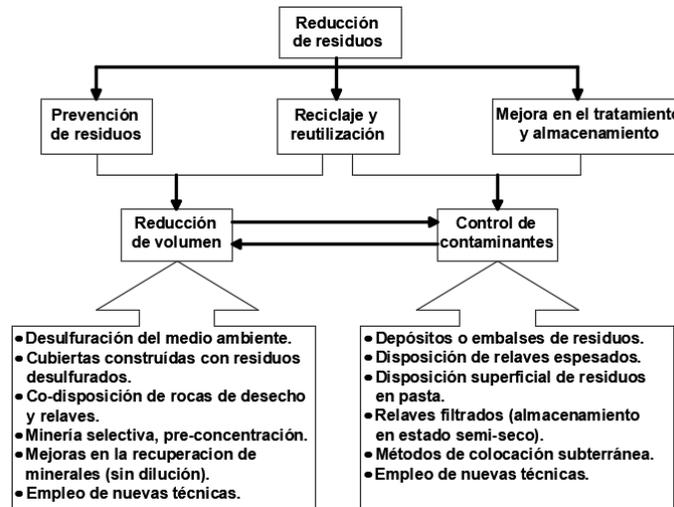


Figura 8.2: Flujo que ilustra el manejo para reducción de residuos mineros (Yilmaz, 2011).

En el diseño de depósitos de residuos mineros, así como toda obra de ingeniería, se diseñan con base en los estados límites de falla y límites de servicio. El primero se refiere a que la estructura sea capaz de soportar cargas y sollicitaciones a las que se verá sometida para evitar una falla catastrófica, y el segundo, se refiere a que los asentamientos y desplazamientos de la estructura se mantengan dentro de límites fijados por necesidades de funcionamiento o por restricciones de los códigos o reglamentos de construcción. En el caso de depósitos mineros se debe tomar en cuenta, además, otros estados límite de servicio, que están relacionados con el cumplimiento de normativas ambientales. Es decir, el depósito de residuos puede ser seguro contra falla y tener desplazamientos admisibles. Sin embargo, la infiltración del embalse puede ser de tal magnitud que contamine un acuífero. Por tanto, el diseño de la obra debe ser modificado para evitar que esto ocurra (Jaime, 2011).

En términos de ubicación y diseño del depósito, la protección de la calidad del agua subterránea es quizás el aspecto de protección ambiental más importante (Davies et al., 2002). Para evaluar los posibles impactos de la calidad del agua subterránea se requiere:

- Establecer las condiciones de calidad del agua subterránea, mediante la recopilación de muestras de aguas superficiales y aguas subterráneas.
- Identificar las principales unidades hidrogeológicas y desarrollar un modelo hidrogeológico del sitio, local o regional.
- Modelar el desarrollo del depósito de residuos y estimar las cargas de contaminantes. Esto puede requerir la caracterización de la capacidad de atenuación en las unidades hidrogeológicas.

El modelado de filtraciones y el modelado de transporte de contaminantes se puede llevar a cabo utilizando modelos de elementos finitos y de diferencias finitas. Estos modelos incluyen regímenes de flujo tanto saturados como no saturados que permiten una mejor predicción del comportamiento en interfase entre los residuos y la atmósfera, donde se produce gran parte de la actividad geoquímica (Davies et al., 2002).

En la Tabla 8.2 se mencionan aspectos ambientales involucrados en el diseño de los depósitos de residuos mineros.

Tabla 8.2: Aspectos ambientales de diseño (modificado de Rowe, 2001).

Ítem	Tipo	Descripción
1	Línea de base ambiental	El conjunto de parámetros que determina los detalles de un programa de monitoreo ambiental y aquel que describe el entorno receptor. La línea de base ambiental relevante es el estado de configuración del proyecto pero que incluye las influencias de proyectos anteriores en la vecindad y de otras perturbaciones inducidas por el hombre. Debe establecerse durante la fase de viabilidad de un proyecto. Si los primeros proyectos en una región tienen los primeros derechos sobre la capacidad del entorno natural para asimilar los desechos, depende del marco legislativo y el enfoque de las autoridades reguladoras.
2	Predicciones de impacto	Una descripción científica del entorno receptor y un conocimiento de la cantidad y calidad de las descargas de residuos permiten hacer predicciones de los impactos directos en la calidad del aire y el agua. Las predicciones son necesarias para establecer consideraciones: <ul style="list-style-type: none"> • No poner en peligro la viabilidad del proyecto y durante la ingeniería. • Desarrollar un programa de monitoreo que sea eficaz y eficiente para detectar tanto las señales de alerta temprana de los efectos ambientales como los impactos reales en el ecosistema. • Definición de los cambios en los parámetros ambientales tanto en las dimensiones espaciales como temporales. Los cambios en la calidad del aire y del agua, por ejemplo, pueden proyectarse para la salud ecológica, la salud humana y las limitaciones para los usuarios alternativos de la tierra y el agua. Las proyecciones de los impactos directos a las consecuencias ambientales se basan en las respuestas asumidas del sistema y es indispensable el desarrollo de un programa de monitoreo ambiental.
3	Selección de parámetros analíticos	La selección de los parámetros analíticos está en función de la naturaleza de los contaminantes que son identificados.
4	Identificación de contaminantes	Dentro de los problemas medioambientales y manejo de riesgos, se encarga principalmente con establecer la fuente, cantidad, distribución, dirección y la velocidad del contaminante en el cuerpo receptor. Se logran identificar con los componentes y características químicas que estos contienen, clasificándose en contaminantes: <ul style="list-style-type: none"> • Inorgánicos: presencia de metales, cianuros y otros aniones como los clorados, sulfatos y nitratos. Los metales como el cadmio, arsénico y plomo son conocidos por sus características tóxicas que afectan la salud humana y el medio ambiente, los metales como el zinc, cobre y níquel afectan principalmente a las plantas. Los cianuros y sulfatos, además, de ser nocivos al humano y al medio ambiente, pueden afectar estructuras de concreto y metálicas, actuando como agentes corrosivos. • Orgánicos: productos de petróleo, solventes y fenoles entre los más importantes. Estos presentan grandes diferencias en sus propiedades químicas, físicas, biológicas y toxicológicas, dando lugar a una partición multifásica cuando suceden emisiones no controladas al medio ambiente.
5	Procesos de contaminación	El agua proveniente de la actividad minera presenta varios procesos geoquímicos y biogeoquímicos que influyen de forma directa e indirecta en la química de las aguas ácidas.

La Asociación Minera de Canadá en 2011, presenta procedimientos típicos a tener en cuenta para la protección ambiental como:

- Tratamiento de planta (unidad de operación, adición de reactivos y control de proceso e instrumentación).
- Aguas superficiales, aguas subterráneas y colección de infiltración, transporte y tratamiento.
- Reducción de polvo, gases o vapores.
- Protección de la vida silvestre y vida acuática.
- Manejo de materiales peligrosos y sustancias designadas.
- Recuperación, vegetación y rehabilitación progresiva.

La evaluación ambiental es un proceso que permite a los tomadores de decisiones considerar los aspectos económicos, sociales, políticos, ambientales que pueden provocar los proyectos o conjuntos de acciones bajo estudio. De esta manera, pueden ser presentados a las autoridades ambientales para que los evalúen de manera formal. Además, se puede informar racionalmente, con los datos del proyecto y estudios específicos, en su caso, a los pobladores de la región o del país, y a los usuarios y beneficiarios según se oportuno (Jaime, 2003; Jaime, 2011).

8.2 Aspectos ambientales de operación y de cierre

Los aspectos ambientales consideran cada uno de los factores ambientales que son impactados por una operación minera. Pueden incluir, pero no deben limitarse al cumplimiento, la topografía, la revegetación, la fauna, el agua, la infraestructura y los residuos. La capacidad de especificar los objetivos de cierre dependerá de la cantidad y calidad de datos ambientales recopilados en ese momento.

La altura y las pendientes pronunciadas de algunos depósitos de residuos como depósitos de relaves o vertederos de roca a veces hacen que la recolección y la revegetación sean imprácticas (Figura 8.3a). Sin embargo, dado que la recuperación de estos depósitos presenta un lugar importante en muchos planes de recuperación y cierre, se requiere una planificación cuidadosa durante las operaciones de mina para facilitar la ejecución del plan de cierre (Figura 8.3b).

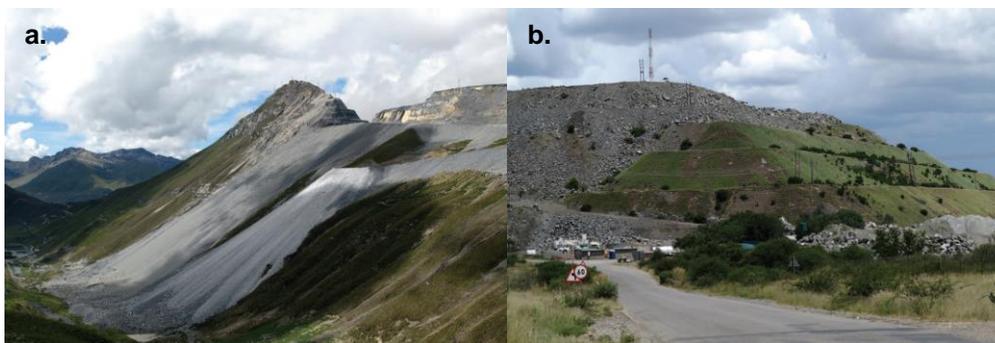


Figura 8.3: a) Vertedero de rocas adyacente a un valle, b) recuperación de vertedero de rocas de desecho en etapa de cierre (Hawley y Cuning, 2017).

Los planes de gestión de residuos deben incorporar aspectos de control y calidad del agua que incluyen: caracterización de residuos, volumen de descarga, ubicación y la

caracterización química del agua que tiene contacto con estos materiales. La ubicación y las cantidades de residuos se documentan en informes medioambientales anuales y existen diversas estrategias disponibles para el manejo de dichos residuos. Debido a los problemas potenciales asociados con la lixiviación de metales y la complejidad de los regímenes de flujo de descarga, las compañías mineras deben tener cuidado de colocar estos materiales. Debido a los costos significativos asociados con la instalación de sistemas de impermeabilización para aislarlos (Boxill y Martin, 2008).

8.2.1 Impactos ambientales

Una zona contaminada es aquella donde se detectó la contaminación del suelo, del agua y del aire. Las caracterizaciones de los contaminantes no siempre son detectadas fácilmente porque al considerar el riesgo y los factores de riesgo, no siempre se tienen estándares de medición que sean aplicables. Al caracterizar una zona contaminada se debe tener en cuenta:

- La naturaleza y distribución de contaminantes en el suelo, y
- La naturaleza, magnitud y la gravedad de las diversas amenazas producidas por los contaminantes.

Jaime en el año 2011, realizó un resumen de los impactos ambientales (Tabla 8.3) provocados por las operaciones mineras durante las fases de estudios previos, construcción, operación y puesta en fuera de servicio (etapa de cierre).

Tabla 8.3: Impactos ambientales de operaciones mineras durante la etapa de estudios previos, construcción, operación y cierre (Jaime, 2011).

Ítem	Agente	Posible impacto
1	Personal	Caza, peces, alteración de la vida de la comunidad, afectación económica, desechos del personal y campamentos.
2	Maquinaria	Ruidos, emisiones contaminantes, aceites y grasas de desecho, talleres de mantenimiento y reparación.
3	Métodos de construcción <ul style="list-style-type: none"> • Excavación a cielo abierto, • Tiros y túneles, • Explosivos, • Martillos neumáticos, • Ductos. 	Polvo de los frentes de trabajo, ruido, vibraciones, manejo de explosivos, disposición de lodos, afectación a la calidad del agua de cuerpos receptores, alteraciones de manantiales y cuerpos de agua, emisiones de contaminantes a la atmosfera, modificaciones topográficas, y topo-batimétricas que afectan el hábitat y alteran la vida de las comunidades.
4	Bombeo	Cambio de régimen hidrogeológico que puede afectar manantiales y pozos de la región.
5	Excavaciones y rellenos	Alteración del paisaje, afectación a flora y fauna, pérdida de hábitat, alteración del drenaje natural.
6	Manejo del agua, lodos de rechazo y lixiviados	Afectación de la calidad del agua de arroyos, ríos, lagunas y acuíferos.
7	Almacenes de residuos	Contaminación al aire, suelo, cuerpos de agua y acuíferos por polvo y lixiviados.
8	Caminos de acceso	Alteración del paisaje, afectación a flora y fauna.
9	Portales de túneles	Alteración del paisaje y del hábitat.

La actividad minera provoca la alteración del paisaje además de afectar la flora y fauna. Se modifica los cauces naturales de agua, se restringe el crecimiento de plantas y el hábitat de animales de la zona afectada (Figura 8.4).



Figura 8.4: Alteración de paisaje por una operación minera.

La presencia, el tipo, la cantidad y la distribución de contaminantes deben ser estimados, y esto generalmente se logra a través de una investigación a detalle del sitio contaminado. Con esta información se establece el peligro y, por tanto, el riesgo asociado con la zona contaminada (Rowe, 2011).

8.2.2 Tratamiento y remediación

Los tratamientos se pueden diseñar para mitigar una gama de características del contaminante, incluyendo: reducción de la solubilidad de metales, reducción de la movilidad y/o toxicidad de los productos orgánicos pesados, y la eliminación de hidrocarburos de petróleo y/o componentes orgánicos volátiles.

Los factores que controlan las reacciones de AMD (drenaje ácido de mina) y la calidad del agua que emanan de los desechos de la mina pueden clasificarse como (Lottermoser, 2010):

- Factores primarios, están directamente involucrados en el proceso de producción de ácidos.
- Factores secundarios, controlan el consumo o la alteración de los productos de las reacciones de generación de ácido.
- Factores terciarios, son los aspectos físicos de los materiales de desecho o el sitio de la mina que influyen en la producción, migración y consumo de ácido.

La contaminación aérea ocasionada por las partículas de residuos que son transportadas por los fuertes vientos, puede ser remediada con la aplicación de coberturas vegetales o químicas.

8.2.3 Monitoreo ambiental

Los criterios de selección y la descripción de la línea base del entorno permiten la selección de elementos específicos para el monitoreo. Las variables físicas y químicas pueden incluir la precipitación, temperatura, flujo, concentraciones de sedimentos suspendidos, velocidad y dirección del viento, niveles de material particulado, pH del agua, concentración de metales pesados disueltos, y la demanda biológica de oxígeno (DBO).

Con la selección de las variables a monitorear, se pueden determinar las ubicaciones, la frecuencia y la rutina de las observaciones necesarias para cuantificar los impactos ambientales, y los recursos necesarios para llevar a cabo el programa. Los parámetros biológicos que se observan generalmente muestran una respuesta que es una integración de la serie temporal de cambios, esto significa que la frecuencia de toma de muestras es variable según el tipo de parámetro a medir.

Para el monitoreo se requieren equipos de campo, instalaciones de laboratorio y gestión de datos, generando un presupuesto adicional. Se deben tomar las medidas necesarias para informar periódicamente los datos y las interpretaciones que se extraen de ellos (Rowe, 2001). La generación de informes generados son la interfaz entre el programa de monitoreo y la gestión ambiental receptiva, tanto internamente al proyecto de minería como con la autoridad ambiental reguladora.

Los parámetros típicos de protección ambiental a considerar en el monitoreo ambiental (Asociación Minera de Canadá, 2011):

- Calidad de descarga de agua/efluente y caudal.
- Propiedades químicas del agua en los poros de los relaves, agua subterránea, agua de infiltración y decantación.
- Carga, cantidad y calidad de polvo/particulado.
- Criterios de emisión de gases o vapor.
- Registro de la cuenca.
- Biomasa/biodiversidad, vida silvestre, vida acuática y hábitat.

8.2.4 Control de contaminantes y remediación

Las principales causas de contaminación en depósitos mineros son la dispersión de partículas sólidas en los alrededores, la filtración o flujo de agua contaminada dentro del nivel freático o en los cursos de agua naturales, y la emisión de gases tóxicos a la atmósfera (ICOLD, 1996). El empleo de barreras de impermeabilización como son los suelos de baja permeabilidad, el empleo de productos geosintéticos o la combinación de ambos, permite reducir la filtración de contaminantes a los cuerpos de agua superficial y subterránea.

La minería es un uso transitorio del suelo que requiere la interrupción y la perturbación del medio ya sea en la superficie o a grandes profundidades dentro de la corteza terrestre para proporcionar al hombre las necesidades minerales y energéticas esenciales. No todos los impactos asociados con la minería son negativos, a veces, los esfuerzos realizados durante la recuperación o mejora de los sitios afectados dan como resultado situaciones que son mejores o más productivas que el uso inicial del suelo. La identificación del tipo de contaminante, el destino (trayectoria), distribución y los riesgos asociados para la salud humana y el medio ambiente, son de importancia para la evaluación del impacto ambiental en la zona afectada. Por tanto, un claro entendimiento de los impactos provocados por la actividad minera y una adecuada gestión ambiental, fomentarán un desarrollo sostenible basado en sus tres pilares, que son: la sociedad, economía y el medio ambiente.

9 EJEMPLO DE APLICACIÓN GEOTÉCNICO - DEPÓSITO DE RELAVES OASIS

Como ejemplo de aplicación se realizará el análisis de estabilidad a un depósito de relaves que se encuentra en Perú y es propiedad de la empresa minera Nyrstar, quien proporcionó y autorizó el empleo de la información necesaria para llevar a cabo los análisis de estabilidad.

Se presenta la descripción general del sitio, topografía, hidrología, hidrogeología, geología, así como, la geotecnia y sismicidad del lugar. Además, se realizaron análisis para verificar la estabilidad en condiciones estáticas y sísmicas, tomando en cuenta las fuerzas de filtración para ambos casos. Estos análisis se llevaron a cabo considerando las etapas en operación y de cierre temporal.

9.1 Resumen ejecutivo

La minera Nyrstar dedicada a la extracción principal de plomo y zinc, cuenta con un depósito para almacenamiento de sus residuos mineros denominado “Depósito de relaves Oasis”, el cual está emplazado en la parte alta de la cuenca de la quebrada Pucarrajo (Figura 9.1).



Figura 9.1: Vista del depósito de relaves Oasis (Nyrstar, 2017).

Este depósito fue diseñado y construido con el relave grueso obtenido del material de fondo del cicloneo (en inglés “underflow”) del relave total, y utilizando el método de construcción aguas abajo. Los relaves finos obtenidos del material flotante (en inglés “overflow”) de los ciclones fueron colocados dentro del depósito.

El depósito de relaves “Oasis” alcanzó la cota 4,499 msnm en la etapa de operación. Este nivel de cota se redujo a 4,497 msnm para la etapa de cierre temporal. El dique inicial o de arranque (starter dam) está hecho de fragmentos de roca que sirven como filtro para captar el flujo del agua del depósito y proporcionar estabilidad al depósito. El material almacenado dentro del depósito presenta una pendiente negativa de 1% en dirección a la zona aguas arriba del embalse. Para el control de flujo de agua dentro del depósito se tiene el nivel de estanque de agua a 4493 msnm. El flujo de drenaje se conduce a una cámara colectora (pozo de monitoreo) de filtración ubicada aguas abajo del depósito, de ahí se conduce con el sistema de recirculación de agua de la mina. Para captar las aguas de la cuenca donde está emplazado el depósito se cuenta con canales perimetrales y un camino de acceso para acceder al coronamiento del dique y al área adyacente del sistema de recirculación de agua.

Los flujos que provienen de la cuenca y que fueron captados por los canales perimetrales del depósito confluyen principalmente al fondo de la quebrada y hacia un humedal.

Para el análisis de estabilidad se han tomado en cuenta las investigaciones hidrológicas, hidrogeológicas, geológicas y geotécnicas.

Para reducir la posible contaminación en el entorno del depósito de relaves, este cuenta con un sistema de impermeabilización en el perímetro. Además, dispone de un programa de monitoreo de la calidad del agua superficial y subterránea aguas abajo.

Los datos generales del depósito de relaves se presentan en la Tabla 9.1

Tabla 9.1: Datos generales del depósito de relaves “Oasis” (Nyrcstar, 2017).

Generales		
Tipo de depósito	-	De arena de relaves
Sistema constructivo	-	Aguas abajo
Cota de la corona del dique – etapa de cierre temporal	msnm	4,497
Geometría del depósito – etapa de cierre temporal		
Altura del depósito	m	45
Borde libre mínimo operacional del depósito	m	3
Ancho de la corona	m	16
Talud aguas arriba	-	2H:1V
Talud aguas abajo	-	2H:1V
Longitud de la corona	m	280
Características de los relaves		
Overflow – Porcentaje de finos de relaves finos (lamas)	%	70
Overflow – Densidad natural (lamas)	t/m ³	1.15-1.25
Overflow – Contenido de sólidos	%	30
Underflow – Porcentaje de finos de relaves gruesos	%	30
Underflow – Densidad natural (relave grueso)	t/m ³	2.1-2.2
Underflow – Contenido de sólidos	%	70
Underflow – Gravedad específica	-	3.7
Producción – etapa de operación		
Reserva mineral	t	995 000
Producción nominal diaria	t/día	700
Vida útil del depósito de relaves	años	3.9
Relación relaves/mineral	-	0.856
Producción nominal diaria de relaves totales	t/día	599
Relación de producción de relaves gruesos/relaves finos	-	70/30
Información hidrológica		
Precipitación media anual	mm	1254
Precipitación para un periodo de retorno de 500 años	mm	60
Evaporación media anual	mm	1250
Temperatura media anual	°C	4°
Instrumentación		
Piezómetros tipo Casagrande	-	6
Bancos de nivel	-	3
Sismicidad		
Aceleración máxima horizontal del terreno (PGA) - 2006	g	0.30
Coeficiente sísmico horizontal (1/2PGA)	g	0.15

9.2 Topografía

Se encuentra ubicada al noreste de la ciudad de Lima, en el departamento de Ancash, entre las cotas 4,400 a 5,000 msnm. La topografía del lugar cuenta con actualización a septiembre de 2017 y está referenciada en el sistema de coordenadas UTM Datum WGS84 Zona 18 Sur (Figura 9.2).

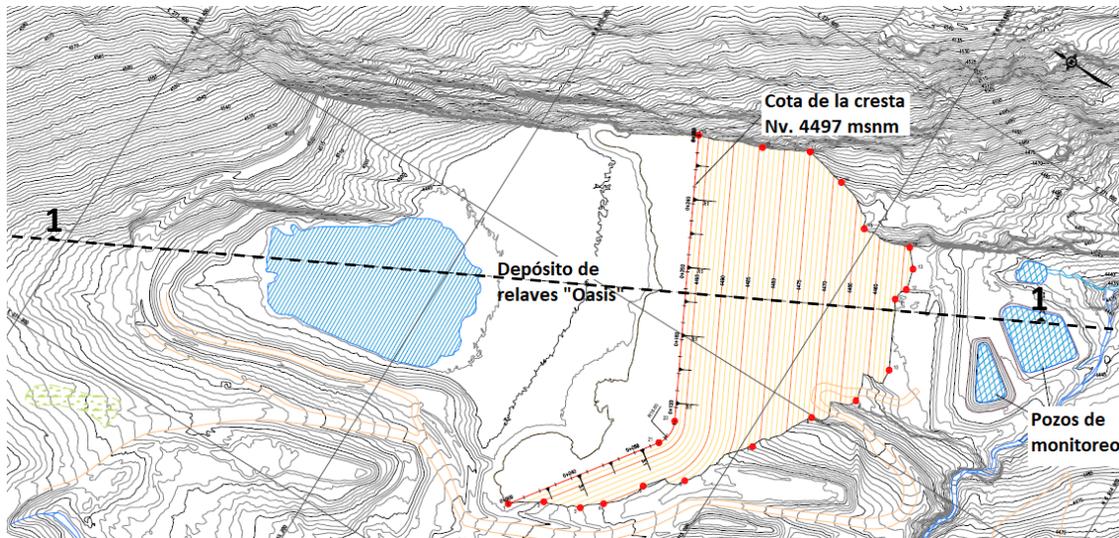


Figura 9.2: Plano topográfico del depósito de relaves "Oasis" y sección 1-1 (Nyrstar, 2017).

9.3 Infraestructura del depósito

El depósito de relaves "Oasis" cuenta con los siguientes componentes (Tabla 9.2):

Tabla 9.2: Componentes del depósito de relaves "Oasis" (Nyrstar, 2017).

Ítem	Componente	Descripción
1	Dique de contención	La altura máxima del dique es de 45 m, el ancho de corona de 16 m, los taludes aguas arriba de 2H:1V y aguas debajo 2H:1V. El talud aguas arriba en contacto con el relave grueso, tiene una capa de enrocado de protección para evitar la erosión del material de filtro-dren ubicado en el pie del depósito.
2	Embalse	En el perímetro del vaso del depósito hasta la cresta del dique se cuenta con impermeabilización con geosintéticos (no se cuenta con impermeabilización en el talud aguas arriba del dique).
3	Sistema de subdrenaje	En el pie del dique del depósito se tiene un filtro-dren y zanjas de drenaje con tubos colectores, los cuales envían las aguas de filtración hacia el pozo de monitoreo. Este sistema cuenta con dren evacuador, un dren principal del sistema tipo espina de pescado desde el pie del depósito actual hasta la poza colectora de filtraciones donde se efectuarán las mediciones de las filtraciones. El sistema de drenaje está compuesto por tuberías ranuradas y material drenante. Aguas abajo de la poza colectora de filtraciones las aguas son conducidas hacia la caseta de bombeo.
4	Pozos de monitoreo/ sedimentación	Cuenta con la instalación de geosintéticos que incluyen, geotextil y geomembrana lisa HDPE de 1.5 mm de espesor. Se realizaron trabajos de preparación de la subrasante, colocación de material de relleno base, instalación de geotextil y geomembrana.
5	Caminos de acceso	De 777 m de longitud, la construcción implicó la limpieza del terreno, eliminación de material orgánico y material inadecuado, excavación en suelo y roca, con revestimiento en los tramos requeridos.
6	Canales de derivación	Tiene la finalidad de evacuar el agua de escorrentía superficial de la cuenca antes de que ingrese al depósito de relaves y derivarla hacia un lugar tal que no afecte las instalaciones. Se cuenta con canales trapezoidales revestidos en mampostería de piedra, este canal será perimetral al depósito de relaves y está diseñado para conducir la avenida máxima de diseño de la cuenca que es de 0.46 m ³ /s, para un período de retorno de 500 años. El cruce del canal por las 2 quebradas que llevan una cantidad de flujo en época de lluvias, se deriva a través de estructuras de disipación y entrega al canal.
7	Sistema de impermeabilización	El área del vaso del depósito se encuentra impermeabilizado, especialmente en las zonas donde se presentan hundimientos del terreno en la zona con estratos de calizas karstificadas, areniscas fracturadas o gravas permeables.

En las Figuras 9.3 y 9.4 se presentan la vista en planta y la sección transversal 1-1 de los componentes que conforman el depósito de relaves “Oasis”.



Figura 9.3: Vista satelital del depósito de relaves Oasis y sus componentes (Google Earth, 2018).

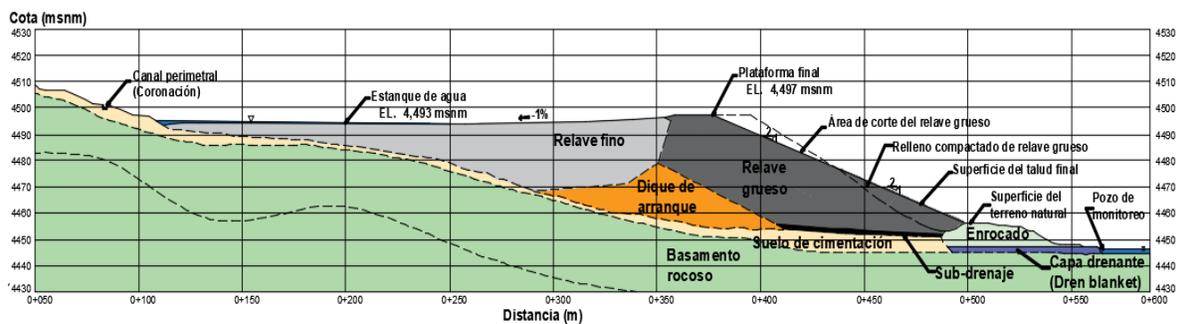


Figura 9.4: Esquema en planta de los componentes del depósito de relaves “Oasis”, sección 1-1.

9.4 Clima e Hidrología

Las condiciones ambientales son influenciadas por la elevada altitud y el terreno montañoso. El clima se caracteriza por tener una temporada húmeda entre los meses de octubre y abril, en la que sucede aproximadamente el 80% de la precipitación que es principalmente pluvial, no obstante, se menciona que también nieva (Nyrstar, 2017). La precipitación anual media es mayor a 1,000 mm y sus temperaturas medias anuales están en el orden de 10 °C.

9.5 Hidrogeología

En general, la geología de la zona de estudio presenta un basamento compuesto por rocas sedimentarias (calizas, lutitas y areniscas) del Cretáceo inferior, el cual está cubierto por depósitos fluvioglaciares, coluviales y aluviales del Cuaternario. Está marcada por una etapa de erosión y posterior sedimentación de origen glaciario, lo cual ha modelado la geomorfología actual. Debido a la presencia de calizas masivas y cuarcitas, la margen izquierda del valle es más prominente y escarpada. En la margen derecha y en el centro

del valle la erosión ha sido más intensa debido a la presencia de lutitas y algunos estratos de calizas kársticas (Nyrstar, 2017).

Los depósitos de cobertura están compuestos de morrena es decir materiales fluvioglaciares que afloran hacia la margen izquierda y en el pie del depósito. Los depósitos coluviales y aluviales depositados por gravedad se ubican en las cabeceras de la margen izquierda del valle. Los depósitos de turba y humedales son recientes y conforman los humedales andinos en el lecho del valle y hacia aguas abajo del depósito.

El humedal más extenso se ubica a unos 1,000 m aguas abajo del depósito, alimentado por afloramiento permanente de agua subterránea proveniente de la propia cuenca del lugar como cuencas adyacentes.

El sistema acuífero local está conformado por el conjunto de rocas fracturadas y permeables del basamento (cuarcitas y areniscas fracturadas, además de calizas kársticas), ubicadas tanto hacia la cola del depósito como hacia el pie. En condiciones naturales, el agua subterránea que circula por dentro de estas rocas proviene de la recarga por las lluvias anuales. El agua luego de infiltrarse se almacena, circula y descarga en la superficie a modo de filtraciones o pequeños manantiales que en conjunto descargan agua a la quebrada alimentando a los demás humedales y arroyos del entorno. En la zona de emplazamiento del depósito la presencia del agua subterránea es mejor evidenciada durante la época de estiaje, cuando a pesar de la ausencia de lluvias, los humedales y arroyos se mantienen activos debido al aporte permanente de agua del acuífero local (Tabla 9.3) (Nyrstar, 2017).

Tabla 9.3: Efectos del depósito de residuos “Oasis” en el flujo de agua (Nyrstar, 2017).

Ítem	Estructura	Descripción
1	Flujo subsuperficial	Gran parte del agua subterránea que circula por el área del depósito, lo hace en forma subsuperficial a través del subsuelo permeable conformado por las gravas que rellenan el cauce del valle o a través de las fracturas y cavidades kársticas de las rocas del basamento. Debido a que este material permeable tiene poca profundidad, el agua circula con cierta facilidad, descargando rápidamente muy cerca de su cauce de origen. Tal es el caso del agua del depósito que ha sido detectada en los manantiales y piezómetros ubicados cerca del pie del depósito. La presencia de las cavidades kársticas indica, además, que existe continuidad hidráulica a lo largo de los estratos semiverticales de calizas, lo cual eventualmente podría originar la aparición de aguas subterráneas contaminadas en las cabeceras del humedal Huashucocha.
2	Flujo profundo	El flujo profundo del agua subterránea, por debajo del depósito de relaves, ocurre a menor velocidad a través de las rocas menos permeables del basamento (calizas medianamente karstificadas y areniscas poco fracturadas). De las perforaciones y análisis de las muestras de agua evaluadas, se ha encontrado que: el flujo profundo del agua subterránea no está influenciada por las fugas o infiltraciones de agua procedentes del depósito y que las fuentes de agua subterránea ubicadas aguas arriba del depósito y las que se sitúan en ambas márgenes de la quebrada Pucarrajo-Huashucocha (aguas abajo del depósito de relaves), presentan rangos de conductividad eléctrica normales, lo cual confirma la escasa influencia de las aguas del depósito.
3	Alteraciones al flujo del agua subterránea	Durante el proceso de construcción se ha ocasionado el incremento de filtraciones de agua subterránea a lo largo del alineamiento de calizas altamente solubles.
4	Impactos al humedal	El agua de la quebrada, al pie del depósito de residuos, presenta elevados valores de conductividad eléctrica, que luego de pasar por el humedal y descargar en la laguna cercana aún mantienen algunos elementos químicos que sobrepasan los estándares ambientales.

El depósito está construido hacia la parte alta de la quebrada, tributario por la margen izquierda de la quebrada Torres. La cuenca es ligeramente elongada hacia el Noroeste, con una longitud del orden de 5 km y pendiente longitudinal promedio de 4° a 5°.

Hacia el estribo izquierdo del depósito Oasis, se encuentra roca caliza grisácea clara y permeable de la formación Santa. Esta formación se presenta en capas subverticales con estratos que tienen una inclinación entre 75-85°.

Hacia el cauce y margen derecha las calizas margosas se intercalan con las lutitas formando paquetes alternos. El conjunto semipermeable es parte del núcleo de un sinclinal simétrico y cuyo eje pasa al lado oeste de una laguna.

Parte de la cimentación del dique y el estribo derecho del mismo, estaría cubierto por un depósito de morrena conformado por gravas arcillosas con arena (GC), suelta a densa, con un espesor promedio de 3.0 m. Este depósito se encontraría parcialmente cubierto a lo largo de la quebrada por suelos aluviales caracterizados como gravas pobremente gradadas con limo y arenas (GP-GM), medianamente densa.

Geomorfología

Ubicado dentro del miogeosinclinal-cuenca Chavín, donde se ha identificado las unidades litológicas denominadas formación Chimú (Ki-ch), Santa (Ki-s) y Carhuaz (Ki-ca), las cuales conforman el Grupo Goyllarisquizga del Cretáceo Inferior. Sobre estos se encuentran los depósitos recientes del Cuaternario, conformados principalmente por morrena, suelo residual y suelo orgánico. A continuación, se hace una breve descripción de las formaciones circundantes al área del proyecto (Nyrstar, 2017).

- Formación Chimú (Ki-ch): Está constituida por estratos de areniscas compactas de 1.0 a 3.0 m de espesor. En la base de esta formación encontramos intercalaciones de lutitas grises oscuras con presencia de lentes y/o paquetes de carbón.
- Formación Santa (Ki-s): Está constituida por estratos de calizas de color azul grisáceo, cuyos estratos presentan espesores entre 0.1 a 1.0 m.
- Formación Carhuaz (Ki-ca): Está constituida por calizas, aunque pueden presentar capas de arenisca y limo arcillitas en la parte central de este proyecto.
- Depósitos del Cuaternario (D-Q): Está conformada por depósitos aluviales, morrena, coluvial, suelo residual, suelo orgánico y humedales. En la zona de proyecto se ha logrado identificar, ubicar y caracterizar claramente estos suelos.

La geología estructural se caracteriza por presentar pliegues largos y estrechos, asociados con grandes sobre escurrimientos. Las formaciones Cretáceas-Jurásicas dan pliegues de hasta 20 km de largo y entre 3 y 4 km de ancho, los cuales son comúnmente concéntricos debido a la naturaleza maciza de las areniscas de la Formación Chimú; sin embargo, en las arcillitas, calizas y areniscas de las formaciones Santa y Carhuaz se observan a menudo plegamientos disarmónicos. Los plegamientos tienen una orientación preferencial NO-SE, en algunos casos con inflexiones que no varían su rumbo general (Nyrstar, 2017).

Dentro del marco fisiográfico se diferencian rasgos propios de cada lugar, estos tienen importancia para entender los patrones evolutivos y de origen de relieve. Los agentes de meteorización juegan un rol importante, de los cuales los más representativos para este modelado son los siguientes: el clima, la lluvia, la glaciación, además de las geformas asociadas a la litología y estructuras tectonizadas.

El desarrollo geomorfológico del área está ligado a diversos procesos tectónicos tales como fallamiento y plegamiento, los cuales son sobreimpuestos por procesos

tectónicos, con presencia de geformas resaltando altas cumbres, farallones, lomadas, modelados por la meteorización física, química y geodinámica externa, obteniendo las siguientes unidades geomorfológicas (Nyrstar, 2017):

- Unidad de relieve cordillerano, es la unidad geomorfológica más ampliamente desarrollada siguiendo el rumbo andino, se caracteriza por presentar una morfología bastante agreste, incidido por una red de drenaje detrítica con numerosas quebradas de corto recorrido. Esta unidad la conforma una cadena de cerros escarpados cuyas cotas sobrepasan generalmente los 4,200 msnm, llegando en algunos casos a más de 5,000 msnm.
- Esta unidad comprende los declives inmediatos al relieve cordillerano y constituye los flancos de los cerros adyacentes al proyecto. Presenta pendientes entre 40° y 60°, estando en función a la litología dominante en el área.

9.7 Geotecnia

En resumen, la caracterización de los materiales encontrados en el área del depósito durante la ejecución de las investigaciones de campo es la siguiente (Nyrstar, 2017):

- Hacia la sección de máxima altura del depósito actual, los relaves se encuentran hasta una profundidad aproximada de 30 m. Bajo el relave se ubica un material de relleno de grava-limo arenosa aparentemente artificial, con el que fue conformado el dique de arranque, en un espesor aproximado de 15 m. A continuación, se encuentra como terreno de cimentación roca caliza margosa, intercalada con lutita bituminosa.
- Hacia el estribo izquierdo se encuentra roca caliza grisácea clara y permeable de la formación Santa, se presenta en capas subverticales con estratos que tienen una inclinación entre 75 a 85°.
- Hacia el cauce y margen derecha las calizas margosas se intercalan con las lutitas formando paquetes alternos. El conjunto semipermeable es parte del núcleo de un sinclinal simétrico y cuyo eje pasa al lado oeste de la laguna.
- Aguas abajo en el área al pie del depósito se tiene una capa de turba, cuyas profundidades varían entre 3 y 7 m, la cual deberá ser removida por completo antes de la construcción de las obras. Por debajo se ubica la roca lutita la cual aflora aguas abajo.

El dique del depósito de relaves ha sido construido con relave grueso cicloneado y fue conformado por el método aguas abajo, apoyado en una cimentación de roca caliza margosa, intercalada con lutitas bituminosas. Sobre esta área se construyó primero un dique de arranque de aproximadamente 15 m de alto, conformado con gravas limo arenosas; efectuándose previamente la remoción de suelos de baja competencia geotécnica, para ser reemplazados por un relleno semipermeable de 2 a 3 m de espesor, sobre el que se apoya actualmente un enrocado de protección aguas abajo del talud.

Exploración geotécnica

En la Figura 9.6 se presenta la ubicación de los sondeos realizados durante el diseño y en la etapa de operación del depósito de relaves “Oasis”.

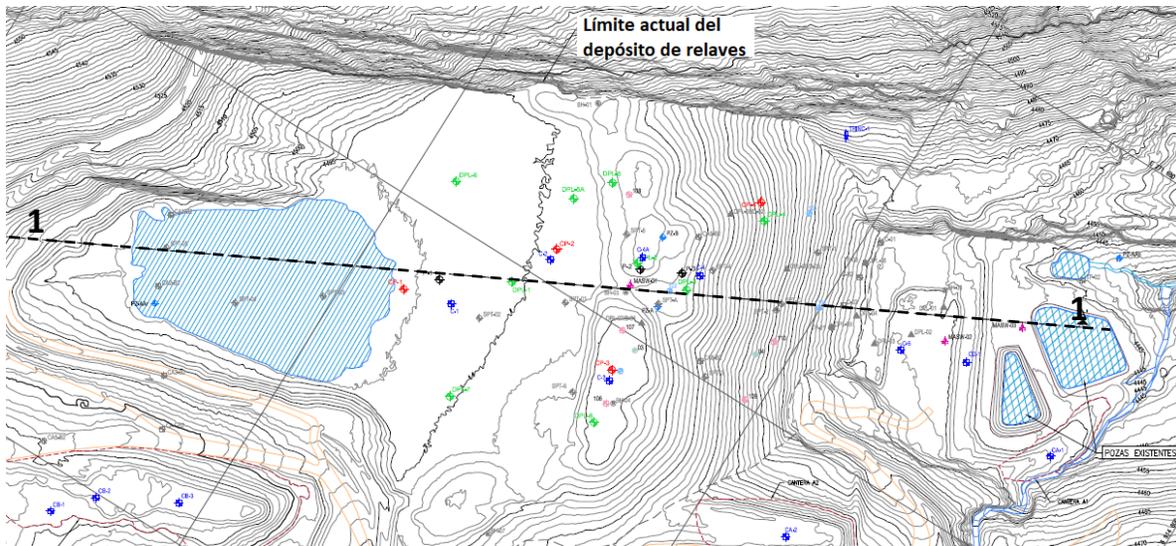


Figura 9.6: Ubicación de sondeos geotécnicos y sección 1-1 (Nysrtar, 2017).

Las investigaciones geotécnicas consistieron en la ejecución de sondeos como pozos a cielo abierto, ensayos de penetración dinámica ligera (DPL), ensaye con Cono Perdido, ensaye de penetración estándar SPT y ensaye geofísico MASW (Tabla 9.4):

Tabla 9.4: Resumen de sondeos realizados en el depósito de relaves “Oasis” (Nyrstar, 2007).

Ítem	Tipo de sondeo	Descripción
1	Pozos a cielo abierto (PCA)	33 PCA en las inmediaciones del depósito. Adicional se tienen registros de 6 PCA y 2 trincheras, ubicadas en las canteras designadas para material de préstamo.
2	Ensaye de penetración dinámica ligera (DPL)	22 sondeos espaciados cada 1 m, alcanzando una profundidad máxima de 5.7 m.
3	Ensaye de Cono Perdido	4 sondeos, se alcanzó la profundidad máxima de 29.6 m.
4	Ensaye de penetración estándar (SPT)	21 sondeos espaciados cada 1 m y hasta una profundidad máxima de 20.45 m.
5	Ensaye geofísico MASW	3 puntos distribuidos a lo largo del dique del depósito y en la plataforma a pie de talud.

Durante los trabajos de extracción de muestras se utilizó el equipo de sondeo de penetración estándar SPT, acondicionado con el tubo de caña partida (Figuras 9.7a y 9.7b).



Figura 9.7: a) Sondeo de penetración estándar, y b) muestra recuperada con tubo de caña partida, dentro del depósito de relaves Oasis (Nysrtar, 2017).

De los trabajos de sondeos por medio de pozos de cielo abierto (PCA) realizados en el depósito de relaves (Figura 9.8a y 9.8b), se tiene que el material depositado presentaba ligera a mediana compactación. Estos materiales eran dispuestos en la etapa de operación con hidrociclones, separando los relaves gruesos en el talud aguas abajo y los relaves finos dentro del embalse del depósito.



Figura 9.8: Vista de dos pozos a cielo abierto y realizados dentro del embalse del depósito de relaves “Oasis”, a) Pozo CA-NA15-106, y b) Pozo CA-NA15-107 (Nyrstar, 2017).

Los ensayos de densidad de campo mediante el método de cono de arena y de reemplazo de agua realizados dentro del embalse y en los taludes del depósito proporcionaron los siguientes valores (Nyrstar, 2017):

- Ocho ensayos con el método de cono de arena. El material identificado es arena limosa SM. La profundidad varía entre 1.0 y 2.0 m. El contenido de humedad varía entre 4.7 y 12.7%, y peso volumétrico natural de 16.4 a 24.8 kN/m³.
- Dos ensayos con el método de reemplazo de agua. El material es arena limosa SM. La profundidad ensayada a 0.5m, con contenido de humedad de 13.6 y 20.3%, y pesos volumétricos naturales de 18.6 y 21.8 kN/m³.

De la exploración geotécnica realizada en campo por Nyrstar durante el periodo del 2006 al 2017, para la identificación de los materiales se tiene:

- Hacia la sección de máxima altura del depósito, los relaves se encuentran hasta una profundidad aproximada de 30 m.
- Bajo el relave se ubica un material de relleno de grava-limo arenosa aparentemente artificial, con el que fue conformado el dique de arranque (starter dam), en un espesor aproximado de 15 m. A continuación, se encuentra como terreno de cimentación roca caliza margosa, intercalada con lutita bituminosa.
- Hacia el estribo izquierdo se encuentra roca caliza grisácea clara y permeable de la formación Santa se presenta en capas subverticales con estratos que tienen una inclinación entre 75 a 85°.
- Aguas abajo en el área al pie del depósito se tiene una capa de turba, cuyas profundidades varían entre 3 y 7 m. Por debajo se ubica la lutita, la cual aflora un poco después.

La sección geotécnica del depósito de relaves “Oasis” se presenta en la Figura 9.9. Los materiales presentes son clasificados según la nomenclatura SUCS.

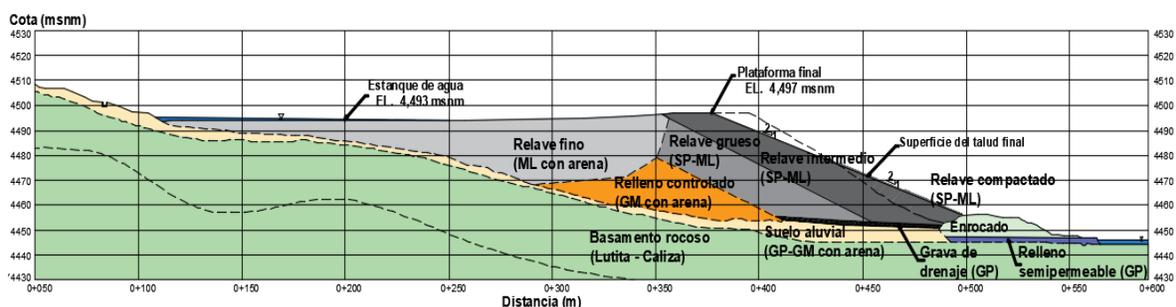


Figura 9.9: Sección geotécnica del depósito de relaves “Oasis”, etapa de cierre temporal.

Zonificación geotécnica

La zonificación geotécnica (Tabla 9.5) es de cuatro unidades que predominan en la zona de emplazamiento del depósito de relaves:

Tabla 9.5: Zonificación geotécnica del depósito de relaves “Oasis” (Nyrstar, 2017).

Ítem	Zonificación	Descripción
1	Depósito coluvial (Unidad geológica-geotécnica I)	Formado por alteración y desintegración en campo de las rocas ubicadas en las laderas superiores por acción de la gravedad. Está formado por gravas limosas con arena (GM), su plasticidad varía de nula a baja, compacidad suelta, color gris, con presencia de gravas angulosas de tamaño máximo 3". Se encuentran distribuidos en las laderas y presenta espesores que varían entre 0.5 y 1.5 m.
2	Depósito aluvial (Unidad geológica-geotécnica II)	Se encontraron en el lecho de la quebrada en la cual se ubica el depósito. Conformada por gravas pobremente gradadas con limo y arenas (GP-GM), compacidad medianamente densa, color gris claro, plasticidad baja, grava subredondeada con fragmentos de roca de tamaño máximo de 4". Tiene espesores que varían entre 1.5 y 3.0 m de profundidad y presenta adecuadas características geotécnicas de cimentación en superficie debido a su compacidad suelta.
3	Depósito morrénico (Unidad geológica-geotécnica III)	Se origina a partir de procesos de desglaciación y gelifracción que actúan sobre el basamento rocoso. Estos suelos están conformados por gravas arcillosas con arena (GC), la plasticidad es media a alta, compacidad suelta a densa, color marrón, con presencia de gravas subredondeadas a redondeadas y fragmentos de roca de tamaño máximo 7". Este depósito presenta un espesor promedio de 3.0 m.
4	Basamento rocoso (Unidad geológica-geotécnica IV)	Se identificó la presencia de afloramientos estratificados de arenisca, caliza y caliza margosa. Los tipos de roca encontrados en el área de influencia del proyecto: arenisca (roca de mala a regular según la escala RMR de Bieniawski, color gris presenta juntas ligeramente rugosas a rugosas rellenas con óxidos y arcilla), caliza (roca mala a regular, color gris y presenta juntas ligeramente onduladas rellenas de arcilla) y caliza margosa (roca mala, color gris oscuro, presenta juntas ligeramente rugosas a rugosas rellenas con óxidos y arcilla).

Caracterización geotécnica

Los resultados de los ensayos de laboratorio realizados en el periodo de 1999 hasta 2017, consistieron en caracterizar los materiales del depósito de relaves. Las características físicas de los relaves (Tabla 9.6) se encuentran en función del tipo de descarga realizada por el hidrociclón.

Tabla 9.6: Resumen de las características físicas de los relaves (Nyrstar, 2017).

Tipo de descarga	Descripción	Unidad	Valor
Material flotante (Overflow)	Porcentaje de finos de relaves finos (lamas)	%	70
	Densidad natural (lamas)	t/m ³	1.15-1.25
	Contenido de sólidos	%	30
Material de fondo (Underflow)	Porcentaje de finos de relaves finos (lamas)	%	30
	Densidad natural (lamas)	t/m ³	2.1-2.2
	Contenido de sólidos	%	70
	Gravedad específica	-	3.7

La descripción visual de las muestras ensayadas en la obtención de los parámetros de resistencia en el ensaye de compresión triaxial consolidada no drenada (CU), es:

- C-3/M-2: Relave tipo arena limosa, arena fina, compacidad media, poca humedad, color gris claro. Gravass=0.0%, Arenas=67.2% y Finos=32.8%.
- C-4/M-2: Relave tipo arena limosa, arena fina, compacidad media, poca humedad color gris claro. Gravass=0.0%, Arenas=74.3% y Finos=25.7%.
- CA-NA15-107: Limo con arena de baja plasticidad, arena de grano fino a medio, consistencia blanda a firme, ligeramente húmedo, color pardo rojizo. Grava=0.0%, Arena=49.0% y Finos=51.0%.

Los resultados de los ensayos realizados por Nyrstar se registran en la Tabla 9.7. Los parámetros de resistencia se obtuvieron de ensayos de compresión triaxial consolidado no drenado, para las condiciones del material que conforma el depósito de relaves.

Tabla 9.7: Resumen de parámetros de resistencia de los relaves, ensaye consolidado no drenado CU (Nyrstar, 2017).

Ítem	Sondeo/ Muestra	Zf (m)	SUCS	ω (%)	γ (kN/m ³)	Esfuerzos totales		Esfuerzos efectivos	
						c (kPa)	ϕ (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
1	C-3/M-2	2.0	SM	8.0	20.0	0	27.5	0	31.4
2	C-4/M-2	2.0	SM	10.4	23.5	0.6	36.0	0	39.0
3	CA-NA15-107	1.2	SM	13.6	16.5	38	21.5	16	34

Abreviaturas: SUCS: Sistema unificado de clasificación de suelos; Zf: profundidad; ω : contenido de humedad; γ : peso volumétrico; c: cohesión; ϕ : ángulo de fricción.

En las Figuras 9.9a y 9.9b, se observan los resultados de un ensaye de compresión triaxial consolidado no drenado (CU) realizado a la muestra de relave denominada CA-NA15-107 (Tabla 9.7). Este material de relave fue extraído a 1.2 m de profundidad. Corresponde a un limo de baja plasticidad con arena (LM) y pertenece a la zona ubicada en el talud aguas abajo del dique del depósito (Figura 9.8b). Los especímenes fueron inicialmente reconstituidos a las condiciones de humedad y peso volumétrico en campo, y posteriormente ensayados en laboratorio.

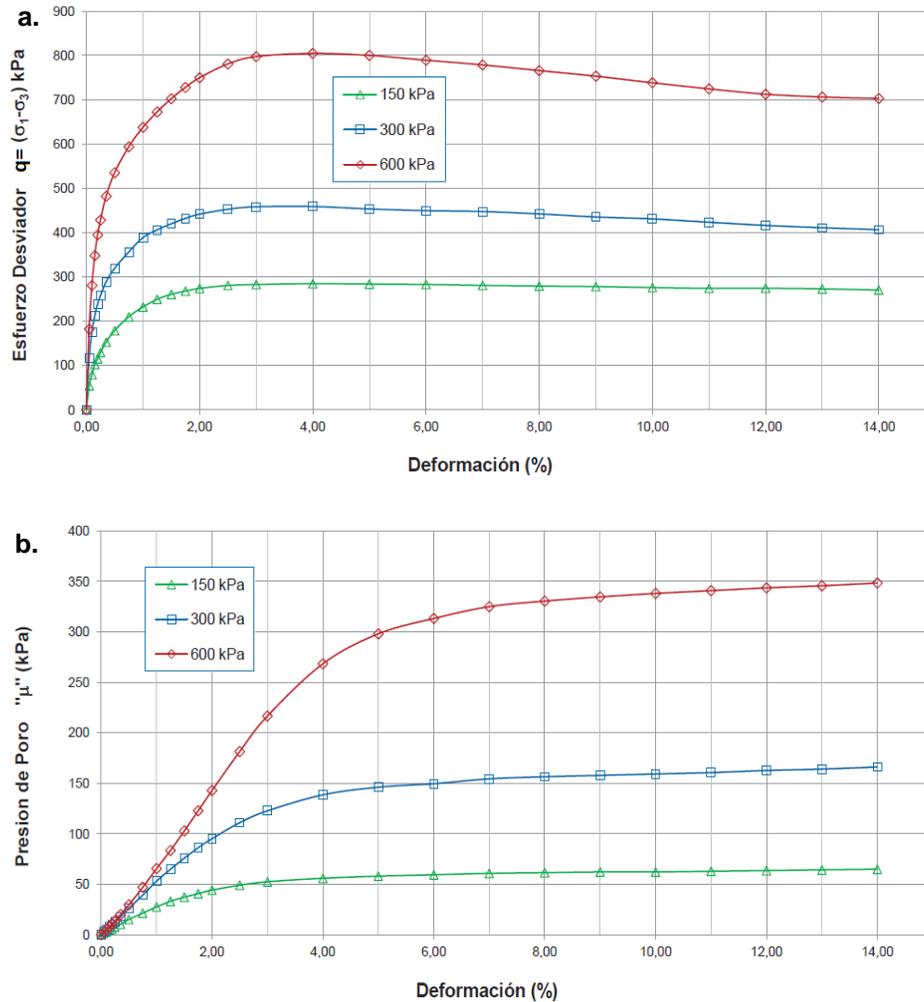


Figura 9.10: Gráficos de ensayos de compresión triaxial consolidado no drenado CU, a) deformación vs. esfuerzo desviador y b) deformación vs. presión de poro (u) (Nysrtar, 2017).

En la Figura 9.10a que corresponde al gráfico de deformación versus esfuerzo desviador, se aprecia que la muestra sometida a 600 kPa de esfuerzo de confinamiento (σ_3) alcanza un valor máximo de 800 kPa de esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$), que corresponde a una deformación de $\varepsilon = 4\%$.

De la Figura 9.10b, se observa que se alcanzaron valores de presión de poro (u) de 60 kPa, 170 kPa y 350 kPa, para los esfuerzos efectivos de confinamiento de 150 kPa, 300 kPa y 600 kPa, respectivamente. Además, se aprecia que las presiones de poro generadas durante los ensayos CU son positivas. Por tanto, los tres especímenes presentaron comportamiento contractivo a los niveles de esfuerzos ensayados.

Los parámetros de resistencia del relave CA-NA15-107 en términos de esfuerzos totales y esfuerzos efectivos se obtuvieron del diagrama de esfuerzos presentados en las Figuras 9.11a y 9.11b, respectivamente.

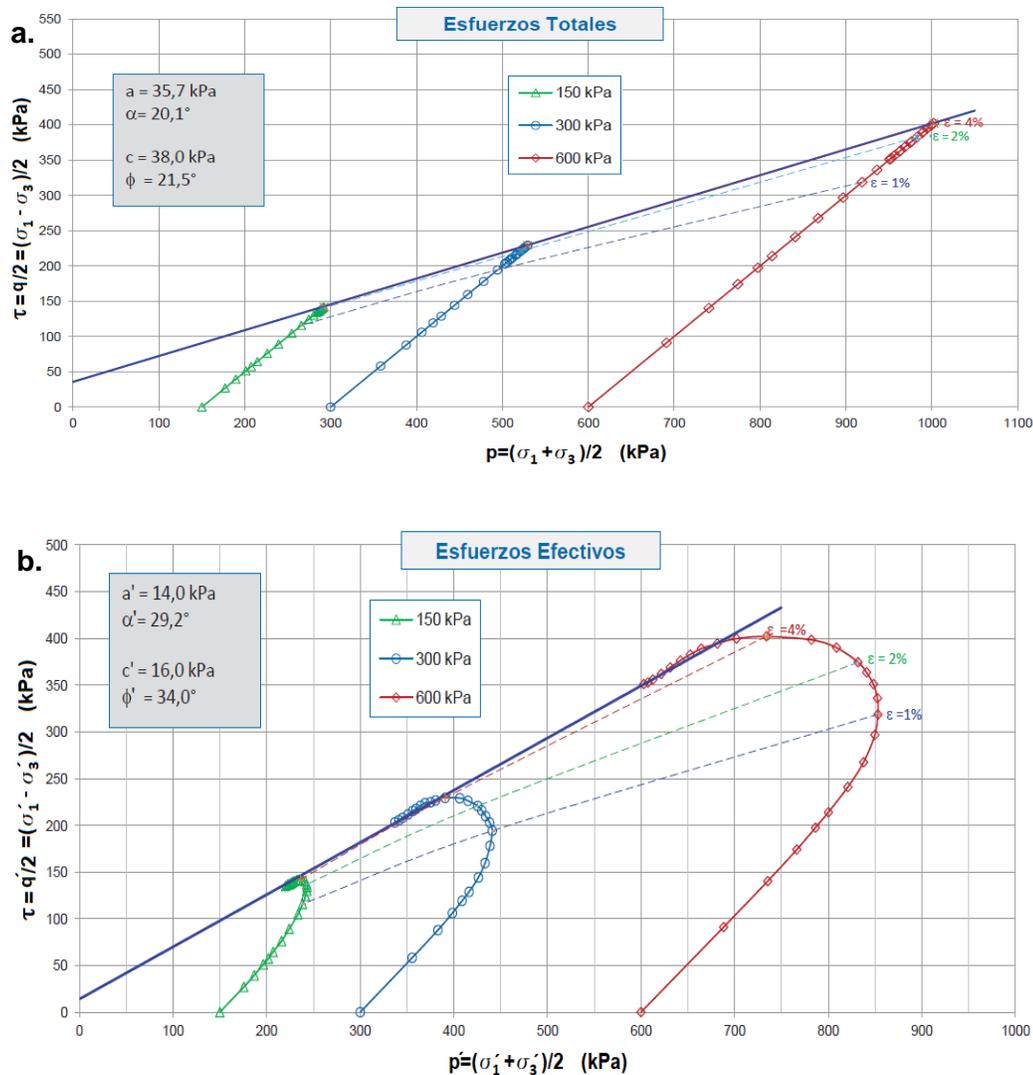


Figura 9.11: Trayectorias en esfuerzos, a) totales y b) efectivos, ensayos de compresión triaxial consolidado no drenado CU (Nysrtar, 2017).

En la Figura 9.11b se observa la reducción de esfuerzos por la generación de presiones de poro debido a la aplicación de cargas en condiciones no drenadas. El cambio de estado de esfuerzos en la trayectoria de esfuerzos efectivos para los tres especímenes ensayados a diferentes esfuerzos de confinamiento presenta características que corresponden a un material de comportamiento contractivo. Los parámetros de resistencia en términos de esfuerzos totales resultaron $c=38.0$ kPa y $\phi=21.5^\circ$ (Figura 9.11a), y en términos de esfuerzos efectivos $c'=16.0$ kPa y $\phi'=34.0^\circ$. Se menciona que estos valores están cercanos a los presentados por Vick en el año 1990. Los parámetros de resistencia de los materiales presentes en el depósito y que fueron empleados en el análisis de estabilidad se presentan en la Tabla 9.9.

Las permeabilidades de los materiales presentes fueron proporcionadas por la minera Nyrstar (Tabla 9.8). Estas son el resultado de los ensayos de laboratorio, de la calibración del modelo con los resultados de la ubicación del nivel de agua en las perforaciones ejecutadas y piezómetros instalados en el depósito y sus alrededores.

Para esto emplearon lecturas de los piezómetros abiertos que corresponde a enero del 2006 hasta mayo del 2007. Estos fueron complementados con el resultado del ensaye de permeabilidad de pared flexible realizado en el año 2015 al relave grueso.

Tabla 9.8: Resumen de permeabilidades de materiales presentes (Nyrstar, 2017).

Material	Permeabilidad k (m/s)
Relave fino (ML con arena)	1.0×10^{-7}
Relave compactado (SP-ML)	1.0×10^{-5}
Relave grueso intermedio (SP-ML)	1.0×10^{-5}
Relave grueso antiguo (SP-ML)	5.0×10^{-6}
Relleno semipermeable (GP)	1.0×10^{-6}
Suelo aluvial (GP-GM con arena)	1.0×10^{-6}
Enrocado	1.0×10^{-5}
Relleno controlado (GM con arena)	1.0×10^{-6}
Grava de drenaje (GP)	1.0×10^{-2}
Basamento rocoso (roca caliza)	-

El nivel freático dentro del depósito se encuentra en función de la ubicación del estanque de agua acumulado que se ubica en la zona aguas arriba del embalse.

9.8 Sismicidad

La empresa minera Nyrstar proporcionó los resultados de aceleración máxima del terreno (PGA), según el estudio de peligro sísmico realizado en el área de la zona del proyecto. El método probabilístico obtuvo resultados de aceleración máxima del terreno para periodos de retorno de 150 y 475 años correspondiente a aceleraciones de 0.30g y 0.44g, respectivamente. La probabilidad de superación para este evento es solo del 4% para un período operativo de 20 años (Nyrstar, 2017). Por tanto, para un período de retorno de 150 años y para una condición temporal de estabilización del depósito, la aceleración máxima correspondiente para realizar el análisis con sismo es $a_h=0.15g$, que equivale a 0.5 veces la aceleración máxima del terreno obtenida del estudio de peligro sísmico realizado por Nyrstar.

9.9 Instrumentación geotécnica existente

La instrumentación geotécnica cuenta con lo siguiente:

- Seis piezómetros abiertos, que permite monitorear el nivel y las presiones de agua. Se emplean sondas eléctricas para registrar la profundidad de la columna de agua.
- Tres bancos de nivel, mediante mediciones por el método de colimación permite monitorear los desplazamientos que ocurran en el depósito.

Los monitoreos son realizados por la minera Nyrstar quien es la que establece las frecuencias de medición según las normativas ambientales vigentes.

9.10 Análisis geotécnico

Se analizó la sección 1-1 (Figura 9.6), considerada como la sección más crítica. Los análisis de estabilidad se realizaron para las condiciones de análisis estática y con acción del sismo en condición pseudo-estática. Se tomaron en cuenta, para ambos casos las fuerzas de filtración generadas por el flujo de agua dentro del depósito, además se obtuvieron los gradientes máximos y de salida, así como los caudales. A continuación, se presentan las consideraciones empleadas para el análisis de estabilidad:

- El análisis estático evalúa la estabilidad física del depósito en condiciones normales, donde las únicas fuerzas desestabilizantes están constituidas por el peso propio de los materiales y las presiones de agua presentes en el cuerpo del depósito.
- El análisis con sismo constituye una forma simplificada de evaluar la estabilidad física del depósito, en caso de la ocurrencia de un sismo. El valor de aceleración máxima horizontal empleado en el análisis es $a_h=0.15g$ (Inciso 9.8).
- Para el análisis de infiltración se consideró a los materiales presentes dentro del depósito como materiales saturados.

Para el análisis con filtraciones se empleó el programa Seep/W versión 2018, que determina las funciones matemáticas para suelos en condiciones saturadas y parcialmente saturadas, como curva característica y función de conductividad hidráulica.

El análisis de estabilidad por equilibrio límite fue realizado con el programa de cómputo Geo-Slope versión 2018. Se consideraron las fuerzas de filtración y las fuerzas sísmicas. Además, se efectuó el análisis de sensibilidad con la variación de valores de ángulo de fricción ϕ y coeficiente de aceleración sísmico horizontal (a_h), con el objetivo de identificar aquellos materiales que presentan mayor incidencia en la estabilidad del talud.

Los parámetros a emplear en el análisis (Tabla 9.9) fueron obtenidos de los resultados de ensayos de laboratorio, ensayos de campo y de modelados realizados por Nyrstar y que fueron presentados en el inciso 9.7.

Tabla 9.9: Resumen de parámetros mecánicos e hidráulicos de los materiales empleados en el análisis de estabilidad (Nyrstar, 2007).

Materiales	SUCS	$\gamma_{húm}$ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	k (m/s)	ϕ' (°)	c' (kPa)
Relave fino	ML	18	19	1.0×10^{-7}	18	0
Relave compactado	SP-ML	21	22	1.0×10^{-5}	34	0
Relave grueso intermedio	SP-ML	20	21	1.0×10^{-5}	30	0
Relave grueso antiguo	SP-ML	21	22	5.0×10^{-6}	35	0
Relleno semipermeable	GP	22	23	1.0×10^{-6}	35	0
Suelo aluvial	GP-GM	20	21	1.0×10^{-6}	30	0
Enrocado	-	23	24	1.0×10^{-5}	42	0
Relleno controlado	GM	20	21	1.0×10^{-6}	37	0
Grava de drenaje	GP	20	21	1.0×10^{-2}	36	0
Basamento rocoso (roca caliza)	-	22	24	-	42	0

Abreviatura: SUCS= Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; $\gamma_{húm}$ = peso unitario húmedo; γ_{sat} = peso unitario saturado; k= permeabilidad; ϕ' = ángulo de fricción efectivo; c'= cohesión efectiva.

Con base en la topografía actual y en la etapa de operación. Para los análisis de estabilidad, se consideró para la etapa de operación la cota de la corona del dique a 4,499 msnm, esta presentaba un talud aguas debajo de 1.6H:1V (antes de los trabajos de estabilización); y al nivel de cierre temporal la cota de la corona del dique de 4,497 msnm con talud de 2H:1V (concluida la estabilización del depósito). La línea superior de corriente fue establecida en función de la ubicación y el nivel del estanque de agua ubicado dentro del depósito. Este nivel de estanque se estableció en la cota 4,495 msnm, con el objetivo de evaluar la condición más desfavorable de almacenamiento de agua en el análisis de infiltración.

En las Figuras 9.12a, 9.12b, 9.13a y 9.13b se presentan los gradientes y perfiles de velocidad, obtenidos del análisis de filtración a las condiciones de operación y de cierre temporal. El basamento rocoso ubicado debajo del depósito de relaves no fue considerado en el análisis de infiltración, debido a que el embalse cuenta con un sistema de subdrenaje que deriva los flujos de agua hacia los pozos colectores.

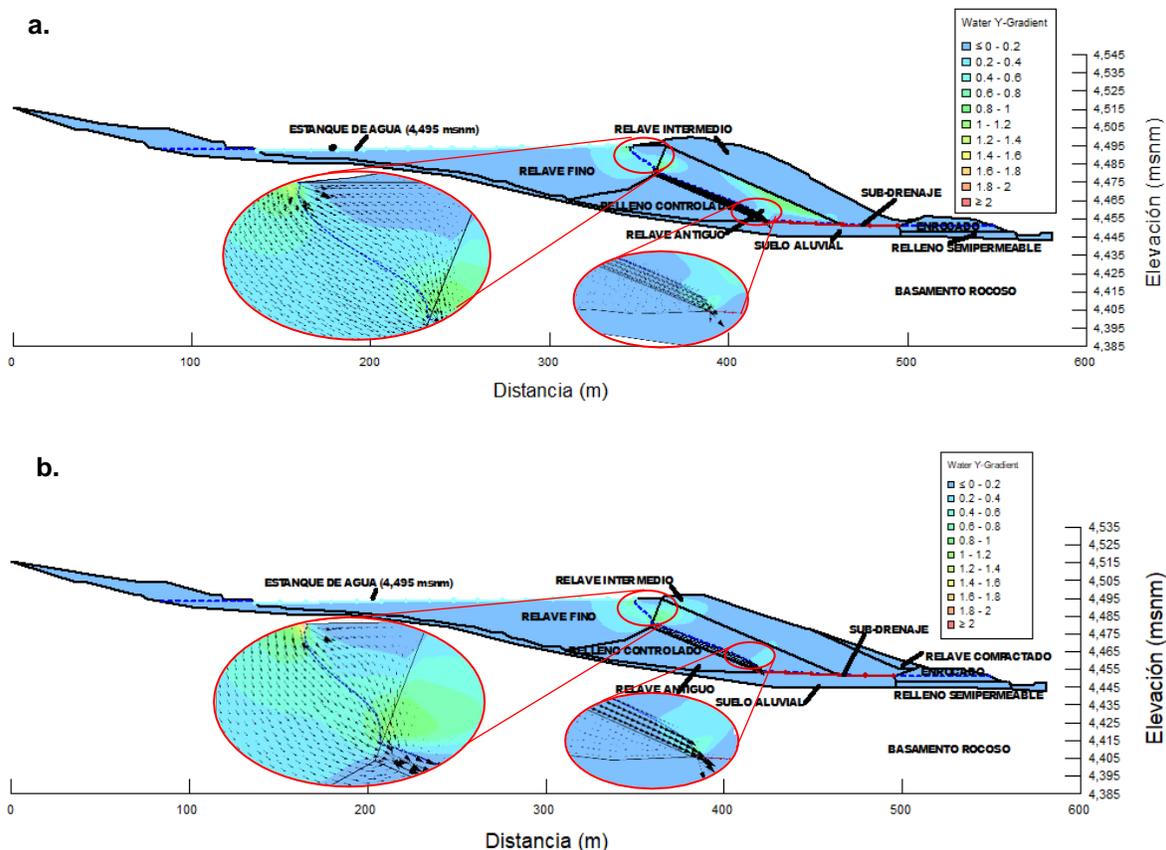


Figura 9.12: Gradientes máximo y de salida en, a) etapa de operación $N_v = 4,495$ msnm y b) etapa de cierre temporal $N_v = 4,497$ msnm.

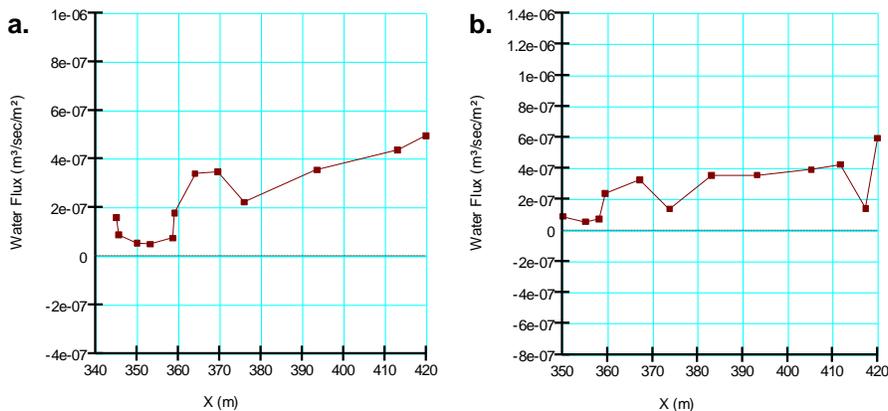


Figura 9.13: Perfiles de velocidad de flujo de agua respecto al eje horizontal, a) etapa de operación $N_v = 4,497$ msnm, y b) etapa de cierre temporal $N_v = 4,499$ msnm.

El gradiente crítico para salida vertical ascendente es 0.9. Del análisis de infiltración se observa que los gradientes presentan dirección vertical descendente (Figura 9.12). El gradiente de salida para ambas condiciones analizadas se determinó en el contacto con el sistema de subdrenaje (capa drenante) y presentan dirección vertical descendente. Los resultados de gradientes y gastos, obtenidos del análisis de flujo de agua se presentan en la Tabla 9.10.

Tabla 9.10: Resumen de gradientes verticales y gasto en el depósito de relaves “Oasis”.

Etapa	Gradiente		Gasto (m ³ /s)
	Máximo	Salida	
Operación Nv. 4,499 msnm	1.2	1.0	4x10 ⁻⁷
Cierre temporal Nv. 4,497 msnm	1.0	1.0	6x10 ⁻⁷

Las salidas de resultados del análisis de estabilidad de taludes en la etapa de operación (Nv. 4,499 msnm) se presentan en las Figuras 9.14a y 9.14b.

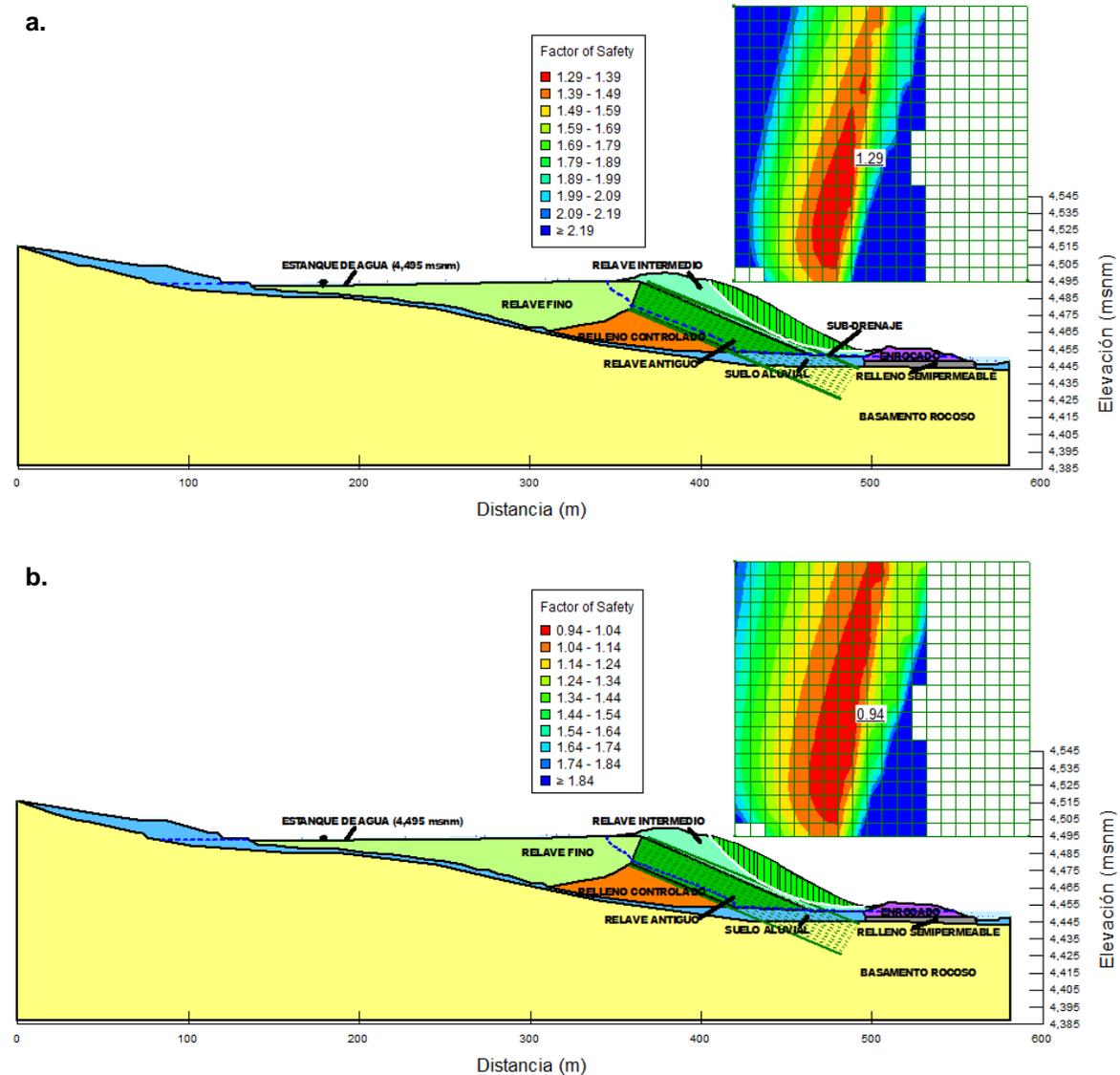


Figura 9.14: Factores de seguridad en la etapa de operación Nv= 4,499, a) condición estática, y b) condición pseudo-estática.

Del análisis de estabilidad en la etapa de operación Nv=4,499 msnm, en condición estática y con sismo, considerando el método de análisis de sensibilidad para cuatro incrementos y decrementos de 1° para el ángulo de fricción y 0.01g para el coeficiente sísmico horizontal, se tienen factores de seguridad FS=1.29 (estático) y FS=0.94 (con sismo).

Los resultados del análisis de estabilidad de taludes para la condición estática y condición con sismo en la etapa de cierre temporal se presentan en las Figuras 9.15a y 9.15b, respectivamente.

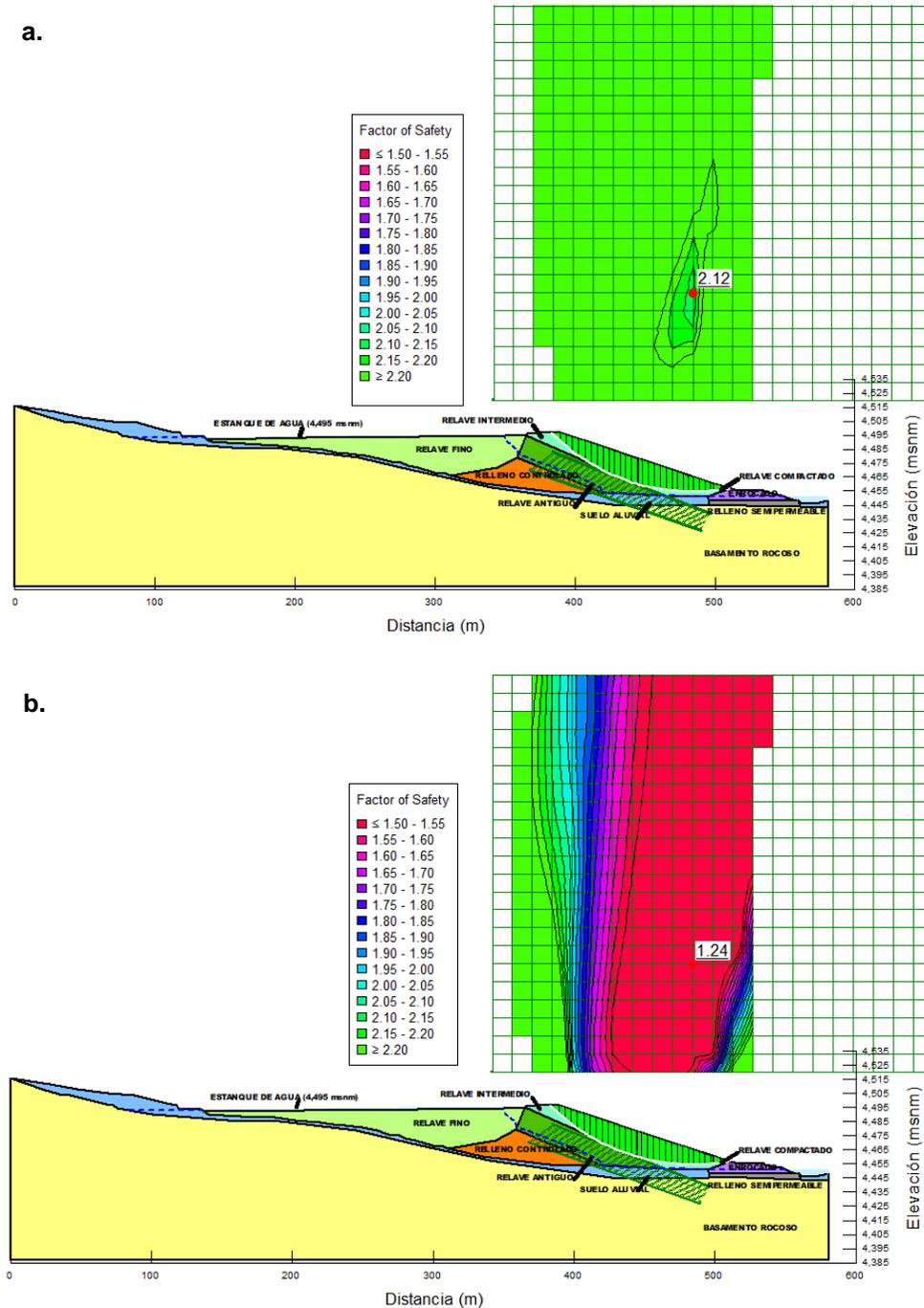


Figura 9.15: Factores de seguridad en la etapa de cierre temporal $N_v = 4497$, a) condición estática y b) condición con sismo.

En el análisis de estabilidad para la etapa de cierre temporal en condición con sismo, considerando el método de análisis de sensibilidad similar al utilizado en la etapa de operación, se tienen factores de seguridad: $FS = 2.12$ (estático) y $FS = 1.24$ (con sismo).

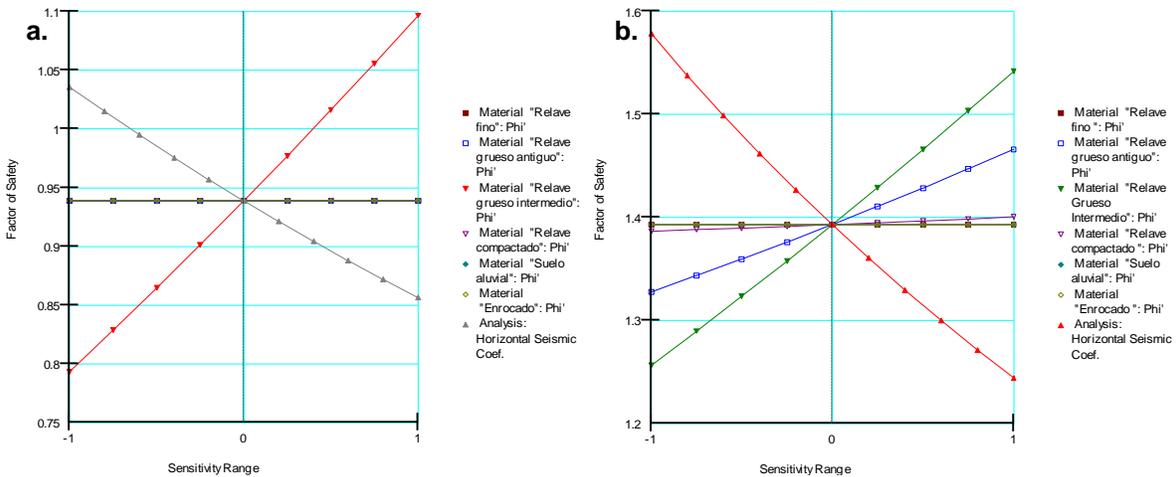


Figura 9.16: Factores de seguridad obtenido del análisis de sensibilidad para la condición con sismo, a) etapa de operación $N_v=4,499$ y b) etapa de cierre temporal $N_v= 4,497$.

En las Figuras 9.16a y 9.16b, se observan los factores de seguridad para los intervalos de variación del ángulo de fricción de los materiales presentes en el depósito y del coeficiente sísmico horizontal. Este último parámetro y el material de relave grueso intermedio ubicado en el talud aguas abajo presentaron mayor influencia en la estabilidad del depósito para la condición con sismo. Los factores de seguridad del análisis de sensibilidad en condición con sismo para la etapa de operación ($N_v. 4,499$) resultaron inferiores a 1. Para la etapa de cierre temporal ($N_v. 4,497$) los factores de seguridad presentan valores superiores a 1.

Los factores de seguridad mínimos considerados para verificar los requerimientos de seguridad respecto a la estabilidad de taludes son los recomendados por United States Bureau of Reclamation (USBR) y la Guía Ambiental para el Manejo de Relaves Mineros emitida por el Ministerio de Energía y Minas del Perú:

- Factor de seguridad mínimo, condición estática es de 1.5.
- Factor de seguridad mínimo, condición pseudoestática es de 1.0.

El resumen de los factores de seguridad FS se presenta en la Tabla 9.11:

Tabla 9.11: Resumen de factores de seguridad

Etapa	Talud analizado	Tipo de falla	Condición	Tipo de análisis	FS	FS mínimo
Operación Nv. 4,499	Aguas abajo 1.6H:1V	Circular	Estática $a_h=0g$ + filtración	No Drenado	1.29	1.5
			Con sismo $a_h=0.15g$ + filtración	No Drenado	0.94	1.0
Cierre temporal Nv. 4,497	Aguas abajo 2H:1V	Circular	Estática $a_h=0g$ + filtración	No Drenado	2.12	1.5
			Con sismo $a_h=0.15g$ + filtración	No Drenado	1.24	1.0

Nota: a_h , aceleración sísmica horizontal.

Del resumen de factores de seguridad de la Tabla 9.11, se tiene:

- El depósito de relaves en la etapa de operación resultó con FS menor a 1.0 (con sismo) y para la condición estática el FS menor a 1.5 (Figura 9.13a y 9.13b).
- Para la etapa de cierre temporal se tiene que los factores de seguridad obtenidos son superiores a 1.0 (con sismo) y a 1.5 (condición estática) (Figura 9.14a y 9.14b). Estos valores cumplen con los valores mínimos recomendados.

9.11 Estabilización del depósito y plan de monitoreo

Se realizaron trabajos de estabilización del talud aguas abajo del dique del depósito relaves “Oasis”, según la configuración geométrica definida en los análisis de estabilidad para cierre temporal. Estos trabajos consistieron en:

1. Definido el nuevo talud (2H:1V) y la cota de la corona del dique (4,497 msnm) para la estabilización del depósito, se realizaron trabajos de corte y acarreo del material de relave almacenado en el nivel superior del talud aguas abajo (Figura 9.17a).
2. El material de corte fue trasladado a la plataforma ubicada en el pie del talud aguas abajo para luego ser conformado y compactado en capas de 0.3 m de espesor, según el procedimiento de compactación definido en el diseño de la estabilización (Figura 9.17b).
3. Luego de conformar y compactar las capas de relleno de relave, se realizaron pruebas de compactación en campo mediante el método de cono de arena. Estos fueron comparados con los resultados de los ensayos Proctor Estándar (Figura 9.17c).
4. Alcanzado el nivel de corte y de relleno de diseño se procedió a nivelar y perfilar los taludes aguas abajo y aguas arriba del dique del depósito (Figura 9.17d).



Figura 9.17: a) Trabajos de corte en el talud aguas abajo, b) conformación y compactación de una capa de relleno en un terraplén del dique, c) verificación del grado de compactación, y d) nivelado y perfilado en el talud aguas abajo del depósito (Nyrstar, 2017).

Al finalizar los trabajos de estabilización para cierre temporal se realizaron actividades de revegetación. Se sembraron plantas endémicas en la periferia del depósito (Figura 9.18a y 9.18b).

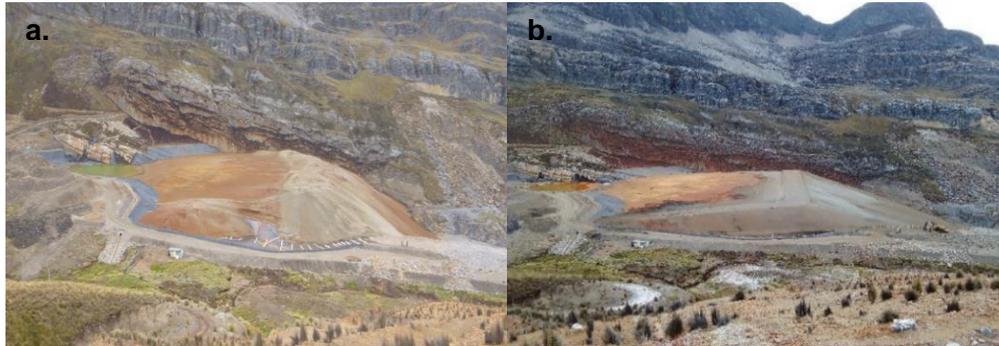


Figura 9.18: Vista del depósito de relaves “Oasis” a) Antes y b) Después de los trabajos de estabilización para cierre temporal (Nyrstar, 2017).

El depósito de relaves “Oasis” cuenta con instrumentación que permite realizar mediciones de presión de agua y parámetros ambientales. Esta instrumentación debe ser complementada con medidores de deformación superficial y profunda para conocer su comportamiento y garantizar un adecuado desempeño durante la etapa de cierre.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1. La actividad minera en muchos países contribuye con un alto porcentaje al Producto Interno Bruto (PIB), por ejemplo, en países como México (4%), Perú (12%); además, generan empleos directos e indirectos. Por tanto, es una actividad económica muy importante para el desarrollo de los países con potencial minero.
2. La elección del sitio y tipo de disposición de residuos mineros se hace durante la etapa de factibilidad, en la cual no se tiene conocimiento de las características de los residuos y de las condiciones hidrogeológicas y geotécnicas del lugar. Es común que se considere un solo método de disposición y no se busquen alternativas.
3. Los países con actividad minera por lo general tienen normas que regulan o limitan la cantidad de contaminantes presentes en las descargas de residuos. Algunos de éstos presentan límites máximos permisibles en el punto de descarga y con estándares de calidad que regulan la cantidad de contaminantes en las zonas aguas abajo o en la periferia de la operación minera.
4. La cantidad de niveles de contaminantes en un residuo no siempre define una afectación al ser humano o al medio ambiente. El efecto combinado de la cantidad de contaminantes junto al tiempo de exposición provocan mayores efectos nocivos. Sin embargo, es necesario limitar la cantidad de residuos de descarga de las minas. Con esto se asegura que el funcionamiento de una operación minera no lleve a un deterioro o alteración del medio ambiente que lo rodea.
5. El análisis y diseño de depósitos mineros es posible a través de un profundo entendimiento de los métodos de disposición y construcción, del comportamiento de los residuos, aunado con un enfoque integrado que evita optimizar un aspecto de la operación a expensas de otro. Estas soluciones deben ser primero concebidas con adecuada información obtenida y recopilada, desde el inicio de los estudios de factibilidad de la mina y con un desarrollo y mejora continua a través del diseño y operación de la misma.
6. En la etapa de diseño de un depósito, el residuo minero no está disponible para caracterizarlo. Se hace uso de información y experiencia de operaciones similares y que fueron reportadas en la literatura y en algunos casos se obtienen resultados de análisis realizados al mineral a extraer en plantas de beneficio de características similares a la mina que entrará en operación. Los parámetros son contrastados durante las etapas de construcción y operación, la caracterización se realiza tanto en campo como en laboratorio. Estos resultados permitirán evaluar los residuos y determinar si es necesario modificar o rediseñar la configuración del depósito.
7. Las fallas en los depósitos mineros ocurridas y registradas en la literatura fueron consecuencia del desconocimiento del comportamiento de los residuos, de la deficiente investigación de campo en la zona de emplazamiento, la falta de monitoreos geotécnicos e hidrológicos, inadecuados trabajos de operación de la mina y ausencia de supervisión y control de calidad.
8. Para detectar la posible contaminación del suelo y de las aguas subterráneas en la fase de construcción, operación y cierre, es indispensable tomar las medidas correctoras adecuadas antes de que se propague la contaminación. Es necesario monitorear suelo, agua y aire durante las operaciones mineras y después del cierre para asegurar que no se esté contaminando el medio ambiente.

9. Los aspectos ambientales desarrollados en una operación minera conllevan al conocimiento en conjunto de los daños o alteraciones que la minería pueda ocasionar. Definir la línea de base ambiental durante la etapa de diseño permitirá a la mina identificar y predecir cuál será el comportamiento del medio durante la etapa de construcción y operación de los depósitos mineros. Las estrategias de manejo, conocimiento de los impactos ambientales, monitoreo ambiental, trabajos de mitigación o remediación, y el control de los contaminantes, son parte esencial para presentar un desarrollo sostenible desde el punto de vista ambiental.
10. Del análisis de estabilidad realizado en el ejemplo de aplicación del capítulo 9, el depósito de relaves resultó inestable en la etapa de operación. Con la solución adoptada de estabilización se demuestra mediante los análisis efectuados que el depósito se mantiene estable para las condiciones de cierre temporal.

Recomendaciones:

1. Las empresas mineras deben efectuar el monitoreo constante de los niveles, presión y cantidad de contaminantes de agua dentro del depósito y en la periferia del mismo, éstas deben estar en conformidad con las normativas ambientales vigentes de cada país.
2. Los análisis de filtración de contaminantes a realizar durante la vida útil de la mina y en la etapa de cierre, deben considerar los efectos del transporte que se presentan como advección (convección), difusión, sorción (adsorción física o química) y reacción química (biodegradación).
3. Se recomienda analizar la interacción entre los compuestos geosintéticos empleados como barreras de filtración con el objetivo de evitar la migración de contaminantes a la periferia de los depósitos de residuos mineros, teniendo en cuenta que estos materiales son propensos a la degradación cuando son expuestos a diferentes condiciones de operación.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

1. Abramson, L., Lee T., Sharma, S. & Boyce, G. (2002). Slope stability and stabilization methods. 2nd Ed. USA: John Wiley and Sons Inc.
2. Agricola, G. (1556). De Re Metallica. Translated by HC Hoover and LH Hoover in 1912. Reprinted in 1950. USA: Dover Publications New York.
3. ANZFMW. (2000). Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality. National Water Quality Management Strategy. Vol. 1. Australian and New Zealand Environment and Conservation Council. Australia.
4. Azam, Q. & Li, Q. (2010). Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. Waste Geotechnics.
5. Barton, N. (2008). Shear Strength of Rockfill, Interfaces and Rock Joints, and their Points of Contact in Rock Dump Design. Rock Dumps 2008, Australian Centre for Geomechanics. The University of Western Australia.
6. Bernal, M. (2016). Influencia de la compacidad relativa y el esfuerzo efectivo en el comportamiento esfuerzo-deformación de jales saturados. Tesis para obtener el grado de Maestro. Universidad Nacional Autónoma de México.
7. Blight, G. & Fourie, A. (2003). A review of catastrophic flow failures of deposits of mine waste and municipal refuse. Introductory report of the International Workshop on Occurrence and mechanisms of flows in natural slopes and earthfills. Mayo 2003, Sorrento. Italy.
8. Blight, G. (2010). Geotechnical engineering for mine waste storage facilities. London: CRC Press.
9. Boxill, L. & Martin, T. (2008). Reclamation and closure cost planning and estimation and the mining life cycle. Proceedings of the 12th International Conference. Colorado. October 2008. USA.
10. Brand South Africa. (2018). SA's key economic sectors. Visitado el 03/03/2018. <https://www.brandsouthafrica.com/investments-immigration/business/investing/sas-key-economic-sectors>
11. Brantes, R. (2008). Análisis comparativo de normativas de descarga de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Chile: Comisión chilena del cobre – Dirección de estudios.
12. Cacciuttolo, C. & Tabra, K. (2015). Water Management in the Closure of Tailings Storage Facilities. 10th International Conference on Acid Rock Drainage & IMWA Annual Conference. Santiago de Chile. Chile.
13. CAMIMEX. (2017). Mapa de Indicadores mineros 2016. Visitado el 25/04/2017. <https://www.camimex.org.mx/>
14. Castro, G. (1969). Liquefaction of sands. Thesis to obtain the degree of doctor. Universidad de Harvard.
15. Castro, G. (2003). Evaluation of seismic stability of tailings dams. 12th Panamerican conference on soil mechanics and geotechnical engineering – 39th U.S. Rock mechanics symposium. Cambridge. USA.
16. COCHILCO. (2017). Base de datos-Estadística. Visitado el 27/12/2017. <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases%20de%20Datos/Bases-de-Datos.aspx>
17. Cheremisnoff, N. (2003). Handbook of solid waste management and waste minimization technologies. USA: Butterworth-Heinemann, Elsevier Science.
18. Davies, M., McRoberts, E. & Martin, T. (2002). Static liquefaction of tailings–fundamentals and case histories. The proceedings on Tailings Dams 2002. Canada.
19. Davies, M., Lighthall, P., Rice, S. & Martin, T. (2002). Design of tailings dams and impoundments. Tailings and Mine Waste Practices SME. Phoenix. USA.

20. Department of Environmental Affairs. (2004). National Environmental Management: Air Quality Act, 2004. Republic of South Africa.
21. Department of Foreign Affairs and Trade. (2017). Growing Australia's mining services exports. Australian Government. Visitado el 01/09/2017: <http://dfat.gov.au/about-us/publications/trade-investment/business-envoy/Pages/august-2017/growing-australias-mining-services-exports.aspx>
22. Department of Transportation. (2015). Geotechnical design procedure: Liquefaction potential of cohesionless soils. State of New York department of transportation. Geotechnical engineering bureau.
23. Duncan, M., Wright, S. & Brandon, T. (2014). Soil Strength and Slope Stability. 2nd Ed. USA: John Wiley and Sons Inc.
24. Engels, J. (2017). Tailings handling and storage techniques. Visitado el 27/05/2017: <http://www.tailings.info/index.htm>
25. Engels, J. (2017). Tailings handling and storage techniques. Visitado el 27/05/2017: <http://www.tailings.info/index.htm>
26. Environment Australia. (2002). Best Practice Environmental Management in Mining. Australia. Visitado el 20/03/2017: www.apfo.org.uk/resource/view.aspx?RID=93778
27. Environment Australia. (2011). A guide to leading practice sustainable development in mining. Visitado el 17/03/2017: <https://industry.gov.au/resource/Documents/LPSDP/guideLPSD.pdf>
28. European Commission. (2004). Reference on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities. Institute for Prospective Technological Studies. Sustainability in Industry, Energy and Transport European IPPC Bureau.
29. Fajardo, T. & Fuentes, J. (2014). The Aznalcollar and the Kolontar Mining accidents. A case study on mining accidents and the criminal responsibility of operators and administrations. A study compiled as part of the EFFACE project. España: University of Granada and University of Jaen.
30. Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. & Foster M. (2014). Geotechnical Engineering of Dams. 2nd Ed. London: CRC Press.
31. Flores, O., Romo M., Castellanos E. & Orozco R. (2002). Comportamiento Estático y Dinámico de Residuos Mineros con 10 y 48% de Finos, XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. SMMS. Noviembre 2002. Santiago de Querétaro, México.
32. Flores, O., Aguilar, R., Reyes L. & Orozco, R. (2010). Estudio de una Presa de Jales en el Edo. De Hidalgo, México, 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. October 2011. Toronto. Canada.
33. Fredlund, D., Rahardjo, H. & Fredlund, M. (2012). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. USA: John Wiley and Sons Inc.
34. Hawley, M. & Cuning, J. (2017). Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design. Australia: CRC Press.
35. Hernández, V. (2016). Influencia de la compacidad relativa y contenido de agua en el comportamiento esfuerzo-deformación de jales parcialmente saturados. Tesis para obtener el grado de Maestro. Universidad Nacional Autónoma de México.
36. Hu, L. et al. (2016). Geotechnical Properties of Mine Tailings. ASCE. Journal of Materials in Civil Engineering. September 2016.
37. ICOLD. (1996). A guide to tailings dams and impoundments. International commission on large dams, Paris. Bulletin 106.
38. ICOLD. (2001). Tailings dams – risk of dangerous occurrences. International commission on large dams. Paris. Bulletin 121.
39. Idriss, I. & Boulanger, R. (2008). Soil Liquefaction During Earthquakes. Engineering monographs on earthquake criteria, structural design, and strong motion records.

40. INGEMMET. (2017). Carta Geológica Nacional. Visitado el 27/08/2017. <http://www.ingemmet.gob.pe/mapa-geologico-50-000>.
41. Ishihara, K. (1996). Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics. USA: Oxford U. Pres.
42. Ishihara, K., Troncoso, J., Kawase, Y. & Takahashi, Y. (1980). Cyclic strength characteristics of tailing materials. Journal Soils & Foundations. Japanese Society of Soils Mechanics and Foundation Engineering. Japón.
43. Jackson, C. & Gardner, E. (1937). Stopping Methods and Costs. Boletín N° 390, U.S. Bureau of Mines.
44. Jaime, A. (1978). Comportamiento de arenas bajo carga estática y cíclica. Tesis para obtener el grado de Maestro. Universidad Nacional Autónoma de México.
45. Jaime, A. (1980). Comportamiento dinámico de suelos. X Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. SMMS. Noviembre 1980. Morelia. Michoacán. México.
46. Jaime, A., Montañez, L. & Romo, M. (1981). Observed and predicted liquefaction of a sand stratum. International conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics. Abril-Mayo 1981. St. Louis. Missouri.
47. Jaime, A., Montañez, L. & Romo, M. (1981). Liquefaction of the Enmedio Island Soil Deposits. International conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics. Abril-Mayo 1981. St. Louis. Missouri.
48. Jaime, A. (2003). Las obras de ingeniería civil y su impacto ambiental. Series del Instituto de ingeniería, UNAM. México. SD/42.
49. Jaime, A. (2011). Ingeniería y protección ambiental para el almacenamiento de residuos mineros. Cuarto seminario de depósitos para jales. Cámara Minera de México. Noviembre 2011. México.
50. Jamiolkowski, M. & Masella, A. (2014). Geotechnical Characterization of Copper Tailings at Zelazny Most Site.
51. Jonsson, J. & Ljunggren, M. (2016). Samarco – immediate causes to the failure of the fundão dam. Summary of conclusions presented by the fundão tailings dam review panel. Sweco ruvdammar och deponeringshantering. Octubre. Gallivare, Suecia.
52. Kossof, D., Dubbin, W., Alfredsson, M., Edwards, S., Macklin, M. & Hudson-Edwards, K. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. Applied Geochemistry. Elsevier.
53. Klohn, E. (1979). Seepage control for tailings dams. In proceedings of 1st International Mine Drainage Symposium. Denver. Colorado.
54. Kramer, S. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall.
55. Leps, N. (1970). Review of the shearing strength of rockfill. Journal of Soil Mechanics and Foundation. ASCE, Vol.96, No. SM4.
56. Li, A., Andruchow, B., Wislesky, I. & Olson, E. (2011). Field Testing of Co-Disposal Techniques for Acid Generating Tailings and Waste Rock at Cerro de Maimón Mine. Proceedings Tailings and Mine Waste 2011. Vancouver. November 2011. Canada.
57. Lira, M. (1998). Diseño de Barreras para Control de Contaminantes. Tesis para obtener el grado de Maestro. Universidad Nacional Autónoma de México.
58. Londoño, L., Londoño, P. & Muñoz, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. Vol. 14 No. 2. Julio 2016. Colombia.
59. Lopez-Acosta, N. & Mendoza, J. (2016). Flujo de agua en suelos parcialmente saturados y su aplicación a la ingeniería geotécnica. Series del Instituto de Ingeniería, UNAM. SID 698.
60. Lottermoser, B. (2010). Mine Waste - characterization, treatment and environmental impacts. 3rd Ed. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
61. Macias et al. (2015). The 27 May 1937 catastrophic flow failure of gold tailings at Tlalpujahuá, Michoacán, México. Natural and Hazards Earth System Sciences.

62. McCarthy, D. (2014). *Essentials of Soil Mechanics and Foundation: Basic Geotechnics*. USA: Pearson Education.
63. Marsal, R. & Reséndiz, D. (1979). *Presas de tierra y enrocamiento*. México: Limusa.
64. Martin, T. (1999). Characterization of pore pressure conditions in upstream tailings dams. *Proceedings 6th Conference International on Tailings & Mine Waste '99*. Fort Collins. January 1999. Colorado. USA.
65. Martin, T., Davies, M., Rice, S., Higgs, T. & Lighthall, P. (2002). *Stewardship of tailings facilities. Mining, Minerals and Sustainable Development*. World Business Council for Sustainable Development.
66. Maureira, S. & Verdugo, R. (2014). El fenómeno de rotura de partículas en suelos arenosos. VIII Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. Sociedad Chilena de Ingeniería Geotécnica. Noviembre 2014. Chile.
67. Meza, V. (2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. *Boletín de Ciencias de la Tierra* N° 31. Julio. Medellín. Colombia.
68. MINAM. (2010). Decreto Supremo N°10-2010-MINAM- Límites de Descarga Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero-Metalúrgicas. Ministerio del Ambiente de Perú.
69. MINEM. (2003). *Guía ambiental para el cierre y abandono de minas*. Ministerio de energía y minas de Perú.
70. MINEM. (2003). *Guía ambiental para el manejo de relaves mineros*. Ministerio de energía y minas del Perú. Dirección General de Asuntos Ambientales. Perú. Visitado el 16/03/2017. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd27/compendio-manejo.pdf>
71. MINEM. (2003). *Guía ambiental para el manejo de drenaje ácido de minas*. Ministerio de energía y minas del Perú. Dirección general de Asuntos Ambientales Mineros, Sub-Sector Minería. Perú. Visitado el 16/03/2017. <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/dgaam/guias/manedrenaje.pdf>
72. MINEM. (2007). *Guía para la evaluación de impactos en la calidad de las aguas superficiales por actividades Minero Metalúrgicas*. Dirección general de Asuntos Ambientales Mineros. Sub - Sector Minería de Perú.
73. Ministry of environment Victoria. (1979). *Pollution Control Objectives for the Mining, Smelting and Related Industries of British Columbia*. Pollution Control Board. Canada.
74. Morgenstern, N., Vick, S. & Van Zyl, D. (2015). *Report on Mount Polley Tailings Storage Facility Breach, Report of Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel to Province of British Columbia*.
75. Morgenstern, N., Vick, S., Viotti, C. & Watts, B. (2016). *Fundao of Tailings Dam Review Panel. Report on the immediate causes of the failure of the Fundao Dam*.
76. Morrison, R. (1970). *A philosophy of ground control*. Ontario Mining Department.
77. NRCAM. (2018). *Minerals and the economy*. Visitado el 05/04/2018. <http://www.nrcan.gc.ca/mining-materials/facts/minerals-economy/20529>
78. NMA. (2016). *The Economic Contributions of U.S. Mining - 2015 Update*. Visitado el 13/03/2017. <https://nma.org/wp-content/uploads/2016/09/Economic-Contributions-of-Mining-in-2015-Update-final.pdf>
79. Nyrstar. (2017). *Informe Geotécnico - Estudio de la estabilidad física de la Relavera Oasis*. Nyrstar S.A.
80. Ormazábal, G. (2008). *Estudio en laboratorio del efecto envejecimiento en el comportamiento de arenas de relave*. Memoria para Optar al Título de Ingeniero, Universidad de Chile.
81. Orozco, V. (2011). *Geotechnical engineering in Mexican tailings dams*. 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. October 2011. Toronto.
82. Oyarzun, R., Higuera, P. & Lillo, J. (2010). *Minería Ambiental—Una Introducción a sus Impactos y su Remediación*. España: Ediciones GEMM.

83. Ramírez, N. (2007). Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. Servicio Nacional de Geología y Minería Departamento de Seguridad Minera de Chile.
84. Rassam, D. & Williams, D. (1999). A relationship describing the shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 36(2). Canada.
85. Rennat, E. & Miller, S. (1997). Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina. Ministerio de energía y minas de Perú.
86. Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A., Díez-Herrero, A., & Pereira, H. (2008). Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. Elsevier- Netherlands.
87. Robertson, A. (1982). Deformation and monitoring of waste dump slopes. Steffen, Robertson & Kirsten. Vancouver. Canada.
88. Robinsky, E. (1982). Thickened tailing disposal in any topography. *Essential Readings in Light Metals*. Ed. Willey & Sons.
89. Rowe, P. (1962). The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. Vol. 269. N°. 1339. October. London. England.
90. Rowe, R. (2001). *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook*. USA: Springer Science Business Media.
91. Santoyo, E. (2010). Exploración de suelos - métodos directos e indirectos, muestreo y pruebas de campo. Vigésima conferencia de Nabor Carrillo. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. Noviembre 2010. Acapulco. México.
92. Salomons, W. & Forstner, U. (1988). *Environmental Management of Solid Waste*. Berlin: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
93. Sarsby, R. (2013). *Environmental Geotechnics*. 2nd Ed. London: ICE Publishing.
94. Seed et al. (1985). Influence of SPT procedure in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering*. Volume 111.
95. SEMARNAT. (2003). Norma Oficial Mexicana NOM141SEMARNAT2003. 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 post-operación de presas de jales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. Visitado el 17/03/2017. <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1317/1/nom-141-semarnat-2003.pdf>
96. SEMARNAT. (2005). Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. Visitado el 17/03/2017. <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nom-residuos-peligrosos>
97. SEMARNAT. (2009). Norma Oficial Mexicana NOM157SEMARNAT2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Visitado el 17/03/2017. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5206928&fecha=30/08/2011
98. SEMARNAT. (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales". Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México. Visitado el 17/03/2017. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4863829&fecha=06/01/1997
99. SERNAGEOMIN. (2002). Guía metodológica sobre drenaje ácido en la industria minera. Ministerio de minería de Chile. Chile. Visitado el 17/03/2017. <http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/cierrefaena/DocumentosRelacionados/Guia-Metodologica-Drenaje-Acido-Industria-Minera.pdf>

100. Shamsai, A., Pak, A., Bateni, S. & Ayatollahi, S. (2007). Geotechnical Characteristics of Copper Mine Tailings: A Case Study. Geotechnical and Geological Engineering. Vol. 25. Springer Science.
101. SME. (2011). SME Mining Engineering Handbook. 3rd Ed. USA: Society for Mining, Metallurgy & Exploration.
102. Steinert. (2017). Escorias de fundición. Visitado el 17/03/2017. <https://steinertglobal.com/es/escorias-y-cenizas/escoria-de-fundicion/>
103. Strachan, C. & Caldwell, J. (2010). New directions in tailings management. Proceedings of the 14th international conference on tailings and mine waste,vail, October 2010. Colorado. USA.
104. Strachan, C. & Goodwin, S. (2015). The role of water management in tailings dam incidents. Proceedings Tailings and Mine Waste 2015. October 2015. Vancouver.BC.
105. Tradings Economics. (2017). Indicators-Country. Visitado el 22/11/2017. <https://tradingeconomics.com/countries>
106. Troncoso, J., Ishihara, K. & Verdugo, R. (1988). Aging Effects on Cyclic Shear Strength of Tailings Materials. Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering. Vol. III. August 1988. Tokyo. Japan.
107. Troncoso, J. (1995). Design and Behavior of Tailings Dams Under Seismic Conditions. Proceedings third International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.
108. Yilmaz, E. (2011). Advances in reducing large volumes of environmentally harmful mine waste rocks and tailings. Miner resources Management.
109. USACE. (2003). Engineering and Design - Slope Stability. Engineering Manual 1110-2-1902. Washington. USA: Department of the Army Corps of Engineers.
110. USEPA. (2003). Code of Federal Regulations title 40 part 440. United States Environmental Protection Agency. Visitado el 16/03/2017: <https://www.epa.gov/eg/ore-mining-and-dressing-effluent-guidelines>.
111. USEPA. (1994). Technical report - Design and evaluation of tailings dams. U.S. Environmental Protection Agency. Washington. USA: United States Environmental Protection Agency.
112. Valenzuela, L. 2016. Design, construction, operation and the effect of fines content and permeability on the seismic performance of tailings sand dams in Chile. Obras y Proyectos N° 19.
113. Van Zyl, D. & Robertson, A. (1980). Subsurface drainage of tailings impoundments: some design, construction and management considerations. Symposium on Uranium Hill Tailings Management, Fort Collins, Colorado, Geotechnical Engineering Program, Civil Engineering Department, Colorado State University. November. 1980. USA.
114. Van Zyl, D. (2017). Brief Review of the Mount Polley and Samarco Tailings Failures. Institute of Mining Engineering, University of British Columbia.
115. Verdugo, R. (2009). Seismic performance based-design of large earth and tailing dams. Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering. Taylor & Francis Group.
116. Vick, S. (1990). Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. USA: BiTech PUB.
117. Villavicencio, G., Espinace, R., Palma, J., Fourie, A. & Valenzuela, P. (2003). Failures of sand tailings dams in a highly seismic country. Canadian Geotechnical Journal N. 51. December, 2013.
118. Wickland, B., Wilson G., Wijewickreme D. & Klein B. (2006). Design and evaluation of mixtures of mine waste rock and tailings. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 43.
119. Witt et al. (2004). Report Tailings Management Facilities – Risks and Reliability. Sustainable Improvement in Safety of Tailings Facilities TAILS SAFE. Bauhaus-University of Weimar. Germany.
120. World Bank. (1998). Pollution Prevention and Abatement Handbook 1998.