

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**Ciclo Optativo de Especialización y Profesionalización  
en Gestión de Calidad y Auditoría Ambiental**



**“ANÁLISIS DE RIESGO DE  
COMPONENTES MINEROS EN CIERRE FINAL  
BASADO EN TÉCNICAS FMECA Y MCDA”**

Presentado por:

Renán Gonzalo Orozco Victorio

**Trabajo de Titulación para Optar el Título de:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**LIMA – PERU  
2016**

# ÍNDICE GENERAL

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1	Justificación .....	2
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo principal.....	3
1.2.2	Objetivos específicos.....	3
<b>II.</b>	<b>REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
2.1	Cierre de minas .....	4
2.1.1	Legislación ambiental aplicable .....	4
2.1.2	Filosofía del diseño de cierre de minas .....	6
2.1.3	Planes de cierre por las etapas del proyecto minero.....	7
2.1.4	Escenarios de cierre de minas.....	10
2.2	Riesgo .....	12
2.2.1	Gestión del riesgo .....	13
2.2.2	Valoración del riesgo.....	16
2.3	Análisis de riesgos .....	17
2.3.1	Estimación de la probabilidad .....	19
2.3.2	Selección de métodos de análisis de riesgo.....	21
2.3.3	Análisis de los modos de fallo, efectos y criticidad .....	24
2.3.4	Análisis de decisión multicriterio .....	29
2.3.5	Proceso de análisis jerárquico.....	32

<b>III.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
3.1	Materiales, equipos y requisitos.....	38
3.1.1	Materiales .....	38
3.1.2	Equipos .....	38
3.1.3	Requisitos de ingreso .....	39
3.2	Metodología.....	39
3.2.1	Lugar de aplicación .....	39
3.2.2	Fase de campo: colección de información.....	39
3.2.3	Fase de gabinete 1: identificación de funciones, modos de fallo y efectos ...	43
3.2.4	Fase de gabinete 2: categorización de severidad .....	44
3.2.5	Fase de gabinete 3: categorización de probabilidad .....	50
3.2.6	Analizar la criticidad de los modos de fallo funcionales.....	56
3.2.7	Cronograma .....	56
3.2.8	Presupuesto.....	58
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>59</b>
4.1	De la fase de campo: colección de información .....	59
4.2	De la fase de gabinete 1: identificación de funciones, modos de fallo y efectos..	62
4.2.1	Descomposición funcional de los componentes en cierre final.....	62
4.2.2	Descripción de funciones.....	62
4.2.3	Descripción de modos de fallos funcionales .....	62
4.2.4	Descripción de efectos de los fallos funcionales .....	63

4.3	De la fase de gabinete 2: categorización de severidad.....	64
4.3.1	Efectividad de la medida de cierre con enfoque en comunidad (EMC <sub>C</sub> ) y medio ambiente (EMC <sub>M</sub> ) .....	64
4.3.2	Característica de la interacción con la comunidad (CI <sub>C</sub> ).....	65
4.3.3	Característica de la interacción con el medio ambiente (CI <sub>M</sub> ) .....	66
4.3.4	Severidad de la consecuencia (SE).....	67
4.4	De la fase de gabinete 3: categorización de probabilidad.....	68
4.4.1	Probabilidad de ocurrencia del evento natural (PEN) .....	68
4.4.2	Factor técnico operacional del componente (FT).....	69
4.4.3	Condición de la instalación (CIN).....	70
4.4.4	Probabilidad del modo de fallo.....	71
4.4.5	Analizar la criticidad de los modos de fallo funcionales.....	72
4.5	del presupuesto presupuesto .....	79
4.6	actividades de mantenimiento.....	79
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>81</b>
<b>VI.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>83</b>
<b>VII.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>84</b>
<b>VIII.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>88</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Clasificación de componentes mineros .....	14
Tabla 2:	Componentes mineros de mayor riesgo .....	15
Tabla 3:	Traducción de términos relativos a probabilidades.....	19
Tabla 4:	Atributos para selección de metodologías de análisis de riesgo .....	22
Tabla 5:	Escala de importancia relativa de criterios.....	33
Tabla 6:	Índice aleatorio de una matriz de comparaciones pareadas .....	37
Tabla 7:	Categorías de efectividad de la medidas de cierre .....	44
Tabla 8:	Categorías de características de interacción con la comunidad .....	46
Tabla 9:	Valor asignado a la interacción con el medio ambiente.....	48
Tabla 10:	Categorías de severidad .....	50
Tabla 11:	Regiones expuestas a fenómenos naturales .....	51
Tabla 12:	Factores técnicos operativos de modos de fallos de componentes mineros ..	52
Tabla 13:	Categorías de condición de la instalación.....	55
Tabla 14:	Asignación del nivel de probabilidad del modo de fallo.....	55
Tabla 15:	Asignación del nivel de criticidad del modo de fallo funcional .....	56
Tabla 16:	Planificación tareas del proyecto .....	57
Tabla 17:	Costos por fases del proyecto .....	58
Tabla 18:	Inventario de componentes en escenario de cierre final.....	59
Tabla 19:	Lista de componentes en escenario de cierre final .....	62
Tabla 20:	Criticidad de los modos de fallo de labores subterráneas en escenario de cierre final.....	73

Tabla 21: Criticidad de los modos de fallo de depósitos de desmonte en escenario de cierre final.....	77
Tabla 22: Criticidad de los modos de fallo de depósitos de desmonte en escenario de cierre final.....	78
Tabla 23: Categorías de criterios técnicos en colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea (FT <sub>1</sub> ).....	112
Tabla 24: Categorías de criterios técnicos en sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea (FT <sub>2</sub> ).....	113
Tabla 25: Categorías de criterios técnicos en acidificación de agua en mina subterránea (FT <sub>3</sub> ).....	114
Tabla 26: Categorías de criterios técnicos en falla de talud por sismo en tajo abierto (FT <sub>4</sub> ).....	115
Tabla 27: Categorías de criterios técnicos en infiltración de DAR de mina (FT <sub>5</sub> ).....	116
Tabla 28: Categorías de criterios técnicos en liberación de relaves por sismo en depósito con dique de arena (FT <sub>6.0</sub> ) y de material de préstamo (FT <sub>6.1</sub> ).....	118
Tabla 29: Categorías de criterios técnicos en liberación de relaves por erosión interna por piping del depósito (FT <sub>7</sub> ).....	121
Tabla 30: Categorías de criterios técnicos en overtopping por lluvia intensa y/o crecida en depósito de relaves con dique con geomembrana (FT <sub>8.0</sub> ) y sin geomembrana (FT <sub>8.1</sub> ).	123
Tabla 31: Categorías de criterios técnicos en overtopping por remoción de masa en depósito de relaves con dique con geomembrana (FT <sub>9.0</sub> ) y sin geomembrana (FT <sub>9.1</sub> ).....	124
Tabla 32: Categorías de criterios técnicos en contaminación de aguas subterráneas por infiltración de DAR desde depósito de relaves con dique de arena (FT <sub>10.0</sub> ), de material de préstamo (FT <sub>10.1</sub> ) y con relaves en pasta (FT <sub>10.2</sub> ).....	126
Tabla 33: Categorías de criterios técnicos en contaminación atmosférica por erosión eólica en el depósito de relaves (FT <sub>11</sub> ).....	128

Tabla 34: Categorías de criterios técnicos en falla de talud por sismo en depósito de rípos de lixiviación (FT <sub>12</sub> ).....	129
Tabla 35: Categorías de criterios técnicos en falla de talud por erosión hídrica en depósito de rípos de lixiviación (FT <sub>13</sub> ).....	131
Tabla 36: Categorías de criterios técnicos en contaminación de agua subterránea por infiltración de DAR en pilas estáticas de rípos de lixiviación (FT <sub>14</sub> ).....	132
Tabla 37: Categorías de criterios técnicos en contaminación de agua subterránea por infiltración de DAR en botaderos de rípos de lixiviación (FT <sub>15</sub> ).....	134
Tabla 38: Categorías de criterios técnicos en contaminación de agua superficial por inundación/crecida en depósitos de rípos de lixiviación (FT <sub>16</sub> ).....	135
Tabla 39: Categorías de criterios técnicos en contaminación atmosférica por erosión eólica en depósitos de rípos de lixiviación (FT <sub>17</sub> ).....	135
Tabla 40: Categorías de criterios técnicos en contaminación de agua subterránea por lluvias en depósitos de estériles (FT <sub>18</sub> ).....	136
Tabla 41: Categorías de criterios técnicos en contaminación de agua subterránea por una crecida en depósitos de estériles (FT <sub>19</sub> ).....	138
Tabla 42: Categorías de criterios técnicos en contaminación atmosférica por erosión eólica en depósitos de estériles (FT <sub>20</sub> ).....	139
Tabla 43: Categorías de criterios técnicos en contaminación de agua superficial por lluvia intensa en depósitos de estériles (FT <sub>21</sub> ).....	140
Tabla 44: Categorías de criterios técnicos en contaminación de agua superficial por crecida en depósitos de estériles (FT <sub>22</sub> ).....	141
Tabla 45: Categorías de criterios técnicos en erosión hídrica por lluvia o deshielo diferido intenso en depósitos de estériles (FT <sub>23</sub> ).....	142
Tabla 46: Categorías de criterios técnicos en deslizamiento por sismo en depósitos de estériles (FT <sub>24</sub> ).....	145

Tabla 47: Categorías de criterios técnicos en lixiviación natural por lluvias en depósitos de escorias (FT <sub>25</sub> ).....	148
---	-----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Desarrollo cíclico de planes de operación y diseño en las etapas de una mina (Robertson et al. 2006) .....	7
Figura 2: Estudios ambientales y escenarios de cierre durante el desarrollo de la mina (MINEM 2006).....	11
Figura 3: Proceso de gestión de riesgos (ISO 2009).....	13
Figura 4: Desastres en la minería en años 2014 y 2015.....	15
Figura 5: Proceso de valoración de riesgos (ISO 2009) .....	16
Figura 6: Proceso de análisis de riesgos (ISO 2009) .....	17
Figura 7: Interpretación de términos relativos a probabilidades (Hillson et al. 2004) .....	19
Figura 8: Modelo de criticidad (IEC 2009) .....	26
Figura 9: Ficha de análisis de modos de fallo de componentes mineros – formato página 1.....	41
Figura 10: Ficha de análisis de modos de fallo de componentes mineros – formato página 2.....	42
Figura 11: Efectividad de las medidas de cierre de componentes mineros con enfoque a la comunidad y medio ambiente.....	64
Figura 12: Interacción de los efectos de los modos de fallo sobre la comunidad.....	65
Figura 13: Interacción de los efectos de los modos de fallos sobre el medio ambiente .	66
Figura 14: Severidad de efectos de modos de fallo de componentes mineros en escenario de cierre final.....	67
Figura 15: Factor técnico operacional de modos de fallo significativo de componentes mineros.....	69
Figura 16: Condición de la instalación de los componentes mineros .....	70

Figura 17: Probabilidad de ocurrencia de modo de fallos significativos de componentes mineros.....	71
Figura 18: Criticidad de los modos de fallo significativos de componentes mineros en escenario de cierre final.....	72
Figura 19: Criticidad de los modos de fallo de labores subterráneas en escenario de cierre final.....	73
Figura 20: Criticidad de los modos de fallo de depósitos de desmonte en escenario de cierre final.....	77
Figura 21: Criticidad de los modos de fallo del depósito de relaves en escenario de cierre final.....	78

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Legislación ambiental aplicable .....	88
ANEXO 2: Glosario de términos.....	99
ANEXO 3: Desastres mineros en el mundo 1941 - 2015.....	109
ANEXO 4: Criterios de factores técnicos de modo de fallo por componente.....	112

## RESUMEN

El presente estudio analiza el riesgo funcional de componentes mineros en el escenario de cierre final aplicando el análisis de modos de fallo, efectos y criticidad (FMECA) y el análisis de decisiones multicriterio (MCDA).

La metodología incluye el listado de todos los componentes mineros, la recopilación y revisión de información relacionada directamente con las causas de los modos de fallo y la determinación de sus niveles de severidad, probabilidad y criticidad. Usando MCDA – AHP (proceso de análisis jerárquico) para la determinación de la probabilidad de ocurrencia.

El resultado del análisis presenta que el 100% de los modos de fallo de labores subterráneas tienen criticidad 1, el 29% de modos de fallo de depósitos de desmonte y el 40% de modos de fallo de depósito de relave tienen criticidad 2; los modos de fallo con nivel de criticidad 3 que requieren mayor control actualmente son: contaminación de agua subterránea por lluvias en depósito de desmonte, contaminación de agua superficial por lluvia intensa en depósito de desmonte, liberación de relaves por sismo en depósito de relaves con dique de material de préstamo y contaminación atmosférica por erosión eólica en depósito de relaves.

«Palabras clave»

- Cierre de minas;
- Análisis de modos fallo, efectos y criticidad FMECA AMFEC;
- Análisis decisión multicriterio MCDA ADM;
- Proceso análisis jerárquico AHP PAJ;
- ISO 31000;
- IEC 60300.

## I. INTRODUCCIÓN

La minería, actividad dedicada a la extracción de recursos de un yacimiento, generalmente se limita a un período de duración de la mina (LOM life of mine) entre 10 a 100 años (MINEM 2006), dependiente de diversos factores tales como: cantidad de reservas explotables, ritmos de producción, demanda del mercado, precios, etc. Sin embargo, al final de la operación minera, el impacto ambiental puede perdurar por un periodo mayor a los 100 años, por lo cual es necesaria una correcta gestión de cierre minero que prevenga impactos ambientales.

El estudio de impacto ambiental relacionado al estudio de pre-factibilidad del proyecto minero hace mención de los objetivos de cierre de mina de modo conceptual. Posteriormente, habiéndose identificado los impactos ambientales, el estudio de factibilidad de proyecto minero debe incluir los costos de mecanismos para la reducir tales impactos.

El objetivo del cierre es eliminar los riesgos de accidentes y las fuentes generadoras de contaminación de suelos y aguas (Aduvire 2000). Es por ello que el Ministerio de Energía y Minas del Perú estableció que, al finalizar el ciclo productivo o actividad de un área dentro de la unidad minera se debe ejecutar el plan de cierre (MINEM 2003) y años después publicó en el año 2006 la guía para la elaboración de planes de cierre (MINEM 2006).

El Ministerio de Energía y Minas (2006) clasifica las actividades de cierre en desmantelamiento, demolición, recuperación, disposición, estabilidad física, estabilidad geoquímica, manejo de agua, establecimiento de la forma de terreno, rehabilitación de hábitats, revegetación, rehabilitación de hábitats acuáticos y programas sociales. Asimismo, requiere que el titular minero debe evaluar el riesgo relacionado con cada componente en la actualización final del plan de cierre y que para ello se debe establecer especificaciones detalladas de tareas de cierre, asimismo presentar las condiciones de monitoreo, cuidado y mantenimiento post cierre requeridos para cada componente a fin de lograr los objetivos de cierre.

El análisis riesgos de modos de fallo y de los efectos y de la criticidad (FMECA) es una técnica reconocida internacionalmente que se utiliza para identificar las alternativas en los que los componentes, sistemas o procesos pueden fallar, considerando la importancia o criticidad del modo de fallo. Esta técnica brinda los datos de entrada y conforma parte de una técnica reconocida internacionalmente ideal para el mantenimiento de estructuras denominada mantenimiento centrado en la fiabilidad.

Por lo cual para mantener la funcionalidad fiable de las estructuras y equipos de los componentes mineros durante largos periodos en el escenario post cierre y la perpetuidad (en algunos casos), es necesario verificar el desarrollo de la evaluación de riesgos en la planificación del escenario de cierre final.

El presente estudio analiza el riesgo funcional de componentes mineros en el escenario de cierre final aplicando el análisis de modos de fallo, efectos y criticidad (FMECA) y el análisis de decisiones multicriterio (MCDA) en la unidad minera HOLY de la empresa minera OFIR.

## **1.1 JUSTIFICACIÓN**

El análisis de riesgo en la planificación de cierre final es conveniente pues permite disminuir la probabilidad de impactos ambientales en el escenario de post cierre de minas, quedando los registros generados como antecedentes para posteriores evaluaciones de riesgos, busca indirectamente preservar los entornos mineros de impactos ambientales adversos, prevenir el incremento sobre los 8616 de pasivos ambientales mineros inventariados (MINEM 2015) e influir en la aceptabilidad de las comunidades en el entorno minero.

El principal beneficio de este trabajo será consolidar una metodología que permita obtener una mayor aproximación en la estimación del riesgo, consecuentemente mejor determinación de tareas de mantenimiento que prevengan pérdidas por impactos ambientales como efecto de las fallas funcionales de los componentes de cierre de minas, basado en la análisis de modos de fallo, efectos y criticidad y el análisis de decisiones multicriterio en los componentes en el escenario de cierre final de la unidad minera HOLY de la empresa minera OFIR (nombres cambiados para guardar la confidencialidad de la empresa minera).

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO PRINCIPAL**

Analizar el riesgo funcional de los componentes mineros destinados a cierre final en la unidad minera HOLY de la empresa minera OFIR, usando los métodos análisis de modos de fallos, efecto y criticidad - FMECA y análisis de decisiones multicriterio - MCDA (IEC 2009).

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Colectar información de los componentes en cierre final de unidad minera HOLY, descomponer y describir sus funciones;
- describir los modos de fallo y sus efectos de los componentes en cierre final;
- categorizar la severidad de los efectos de cada modo de fallo, la probabilidad de ocurrencia y su criticidad.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 CIERRE DE MINAS**

#### **2.1.1 LEGISLACIÓN AMBIENTAL APLICABLE**

##### **2.1.1.1 Ley de Cierre de Minas - Ley N° 28090 (14 de octubre de 2003) y su Reglamento - D.S. N° 033-2005-EM (15 de agosto de 2005) y modificatoria D.S. N° 035-2006-EM (05 de julio de 2006)**

Establece los planes de cierre de minas como instrumentos de gestión ambiental destinados a implementar medidas para rehabilitar las áreas utilizadas o perturbadas por las actividades mineras para que éstas alcancen características de ecosistema compatibles para el desarrollo de la vida y la preservación paisajística. Así también considera a la garantía financiera como el instrumento económico para el cumplimiento del referido Plan de Cierre. Asimismo, el Reglamento de Cierre de Minas establece los procedimientos y condiciones, para la presentación, revisión, aprobación del Plan de Cierre y la correspondiente garantía financiera para su ejecución. La garantía financiera deberá cubrir los costos del Plan de Cierre. El Reglamento establece en su primer artículo como parte del objeto del mismo, el control de los riesgos y efectos sobre la salud, seguridad, ambiente, ecosistema y propiedad, que pudieran derivarse del cese de las operaciones de una unidad minera. Durante las operaciones mineras, el Reglamento justifica en su cuarto artículo que se proceda a paralización (escenario de cierre temporal) a los componentes que estuvieren involucrados con operaciones que presenten riesgo inminente a la seguridad, salud y medio ambiente. Acerca del contenido del Plan de Cierre, establece en su artículo décimo, el mismo deberá sujetarse a la atención prioritaria de los componentes de mayor riesgo.

**2.1.1.2 Aprueban el uso de tasa de inflación y de descuento por parte de los titulares mineros a efectos de determinar el valor presente neto actualizado de los presupuestos del plan de cierre de minas – R.M. N° 262-2012-MEM/DM (13 junio de 2012)**

Establece los métodos permitidos, el formato y la fórmula de cálculo de las tasas de interés y de descuento para determinar el programa de constitución de las garantías financieras.

**2.1.1.3 Guía de Plan de Cierre de Minas - R.D. N° 130-2006-MEM-AAM (24 de abril de 2006)**

Muestra una guía con el fin de apoyar técnicamente a los proponentes en la preparación de Planes de Cierre, de conformidad con la segunda disposición complementaria del Reglamento para el Cierre de Minas.

**2.1.1.4 Régimen del Registro de Entidades Autorizadas a Elaborar Planes de Cierre de Minas - D.S. N° 016-2005-EM (04 de junio de 2005) y Registro de Entidades Autorizadas a Elaborar Planes de Cierre de Minas - D.S. N° 039-2005-EM (11 de octubre de 2005)**

Definen los requisitos para las empresas consultoras y la cantidad mínima de profesionales para la elaboración planes de cierre de minas. En el Anexo 1 se describen normas relacionadas usadas en la gestión de cierre de minas.

### **2.1.2 FILOSOFÍA DEL DISEÑO DE CIERRE DE MINAS**

El Ministerio de Energía y Minas (2006) considera que los cambios potenciales en un sitio determinado dependerán de las condiciones ambientales y socioeconómicas previas a las actividades mineras y de la forma como se manejan estas actividades, por consiguiente determina que la filosofía para el diseño de cierre se basa en las siguientes cuatro premisas:

- Primero, la minería genera cambios permanentes en las condiciones superficiales y sub-superficiales del terreno, cursos de agua y en muchos casos crea cambios permanentes en la comunidad local.
- Segundo, los impactos ambientales negativos de la actividad minera pueden ser manejados de tal manera que el terreno y los cursos de agua retornen a una condición en que puedan ser utilizados después de finalizada la actividad minera.
- Tercero, la minería puede ser manejada de tal forma que los impactos sociales después del cierre sean minimizados.
- Cuarto, la mejor y más factible forma para lograr un legado positivo es “empezar por el final”, considerar desde las primeras etapas del proyecto los efectos y consecuencias potenciales que pueden ocurrir a largo plazo y manejarlos apropiadamente.

En la práctica el diseño del cierre requiere que el titular minero adopte dos formas de trabajo (MINEM 2006):

- Una estrecha coordinación entre el diseño de la mina y los cambios en el plan de operaciones durante la vida de la mina, considerando las condiciones ambientales y sociales durante la operación y el cierre.
- Comunicación permanente y compromiso entre el titular minero y los gobiernos, así como las comunidades y grupos de interés potencialmente afectados para definir objetivos realistas y desarrollar e implementar planes de manejo adecuados.

### 2.1.3 PLANES DE CIERRE POR LAS ETAPAS DEL PROYECTO MINERO

El estudio realizado por Robertson y Shaw (2006) enfatiza que los planes de cierre deben ser reevaluados junto con el avance del desarrollo de la mina, los planes iniciales deben determinar las condiciones proyectadas de cambio como consecuencia a los descubrimientos de yacimientos, cambios en la economía de productos, avances de tecnologías y nuevos requisitos normativos. Una vez que el plan inicial ha sido desarrollado y es aceptado, iterativas re-evaluaciones y revisiones periódicas deben completarse para asegurar que el plan sigue siendo actual, pertinente y optimizado. Esto se traduce en un desarrollo cíclico del diseño del plan de cierre de la mina y sobre las distintas etapas de la vida de una mina tal como se muestra en la Figura 1.

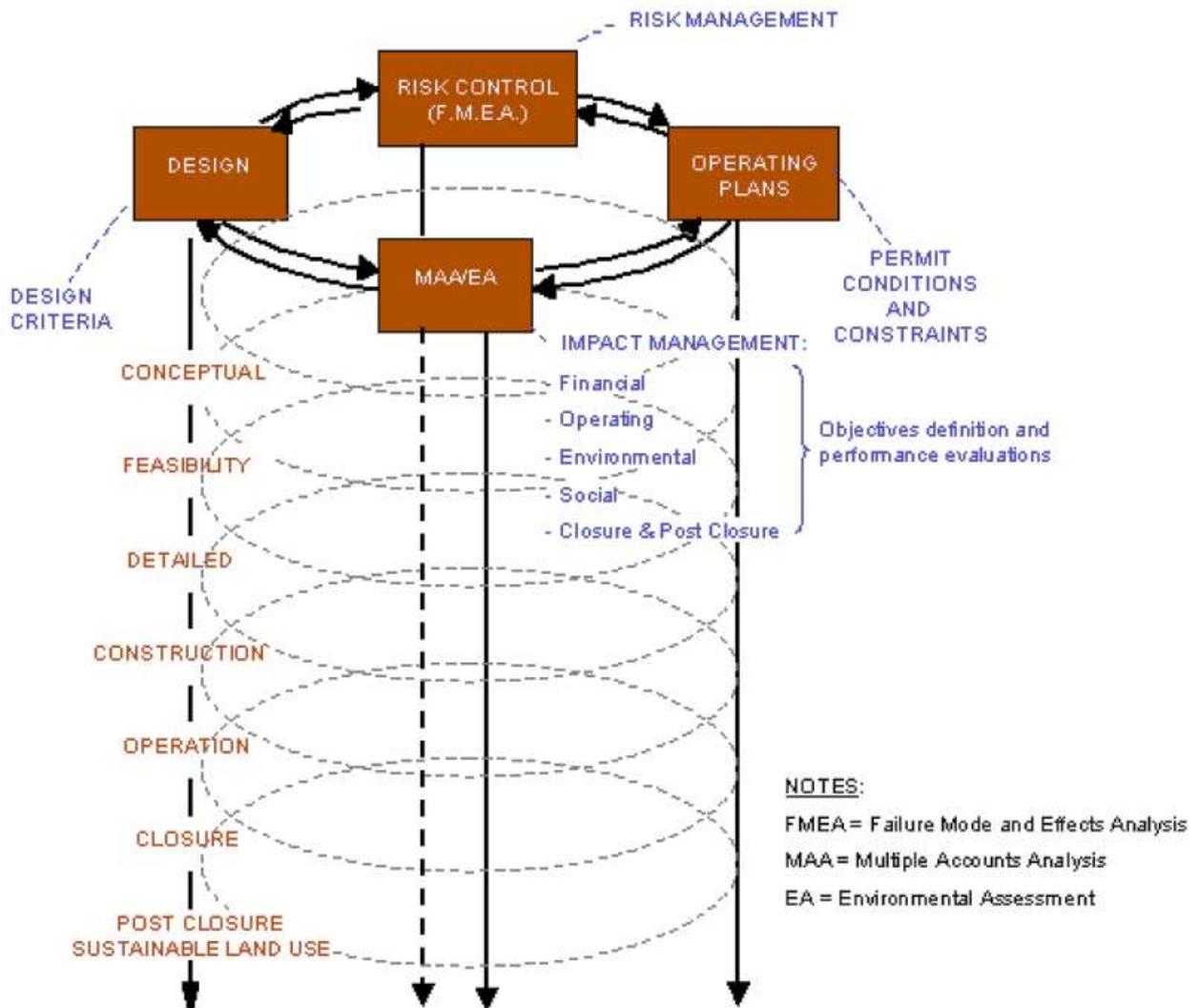


Figura 1: Desarrollo cíclico de planes de operación y diseño en las etapas de una mina (Robertson et al. 2006)

De la Figura 1, el FMEA es el análisis de riesgos de modos de fallo y efectos, el estudio MAA (Multiple Accounts Analysis) proporciona los medios para que los evaluadores pueden seleccionar el más adecuado, o ventajosa alternativa de una lista de alternativas, pesando los beneficios y los costos relativos de cada una. El estudio EA (Environmental Assessment) son los estudios de impacto ambiental.

Del mismo modo el Ministerio de Energía y Minas (2005) normalizó para el Perú que el plan de cierre es un “documento vivo” que es reevaluado y preparado en las etapas del proyecto minero, a descritas continuación y mostradas en la Figura 2:

**Plan de cierre de minas conceptual**, preparado como parte del estudio de impacto ambiental (EIA) y presentado para su aprobación a la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (DGAAM). El plan de cierre conceptual no requiere un estimado de costos del cierre.

**Plan de cierre de minas detallado**, presentado y aprobado antes del inicio de la fase de operación por la DGAAM. Incluirá los resultados de todos los estudios realizados durante el planeamiento final y las etapas de diseño del proyecto. El plan de cierre detallado incluirá estimados de costos para las actividades de rehabilitación propuestas durante la vida de operación de la mina, cierre de la mina, actividades de desmantelamiento, y actividades de cuidado y mantenimiento post cierre. El plan de cierre detallado de la mina debe incluir los escenarios de cierre progresivo, temporal y final.

**Actualizaciones del plan de cierre detallado**, a lo largo de la vida operativa de la mina, la primera a los tres años de aprobado el plan de cierre, y luego cada 5 años o a requerimiento de la Dirección General de Minería (DGM). Estas actualizaciones al plan de cierre considerarán todos los cambios ocurridos en las actividades operativas, rehabilitación progresiva, cambios en la estabilidad física o química de los componentes de la mina, evolución de las relaciones comunitarias, nuevos escenarios de riesgos potenciales no identificados anteriormente y las variaciones en el presupuesto y el monto de la garantía, lo cual contribuirá a mantener la consistencia entre el plan de cierre y la realidad. La DGM también podría requerir una actualización del plan de cierre y el estimado de costos, en el caso que el fiscalizador identifique cambios en las actividades de minado y/o actividades de rehabilitación progresiva que afecten de manera significativa el costo del plan de cierre de mina.

**Actualización final del plan de cierre de minas**, que usualmente es presentado en los últimos años de vida de la mina (menos de cinco años) definirá las actividades que serán definitivamente ejecutadas para el desmantelamiento y cierre del sitio. En este plan de cierre final, el titular minero deberá evaluar los riesgos relacionados con los componentes que, por razones operativas, no hayan sido sometidos a cierre progresivo. Para este efecto, se deberán establecer las especificaciones detalladas de las tareas de cierre, realizar procesos de consulta en relación al cierre de la mina, y evaluar cualquier cambio en el plan de operaciones ocurrido durante la vida de la mina.

**Informes de avance**, son informes semestrales de avance de las labores de rehabilitación. Estos informes presentarán las actividades de rehabilitación propuestas en el último plan de cierre aprobado y las actividades realizadas, así como las actividades propuestas para el siguiente semestre. Asimismo, los informes semestrales incluirán los resultados del programa de monitoreo de las áreas ya rehabilitadas. Los informes de avance semestrales deben continuar aún después de la conclusión de los trabajos de cierre final, hasta la emisión del certificado de cierre por parte de la autoridad.

#### **2.1.4 ESCENARIOS DE CIERRE DE MINAS**

En el Perú las modalidades de cierre han sido normadas en escenarios de cierre por el Ministerio de Energía y Minas (2003), mostrados en la Figura 2 y descritos a continuación:

**Cierre temporal**, como resultado de las circunstancias económicas u operacionales, es posible que las actividades mineras y/o de procesamiento sean temporalmente suspendidas, esperando su reinicio en el futuro próximo.

**Cierre progresivo**, es un escenario que ocurre de manera simultánea a la etapa de operación de una mina, cuando un componente o parte de un componente de la actividad minera deja de ser útil. Debido a ello deberá ser sometido a actividades de cierre tales como desmantelamiento, demolición, restablecimiento de la forma del terreno, y/o revegetación.

**Cierre final**, comienza a consecuencia del agotamiento de los recursos minerales económicos, cesan las operaciones de minado y de procesamiento. El cierre final comprende el desarrollo de actividades tales como: diseños de ingeniería requeridos para el desmantelamiento; demoliciones; estudios in-situ, etc., siendo un proceso que usualmente toma varios años. En el caso de un cierre repentino o no planeado, será necesaria la implementación de un proceso de cierre acelerado. esto incluye la preparación inmediata y la presentación de la actualización del plan de cierre.

**Post cierre**, luego de las actividades de cierre final se desarrolla el programa de actividades descritas en el mantenimiento y monitoreo post cierre.

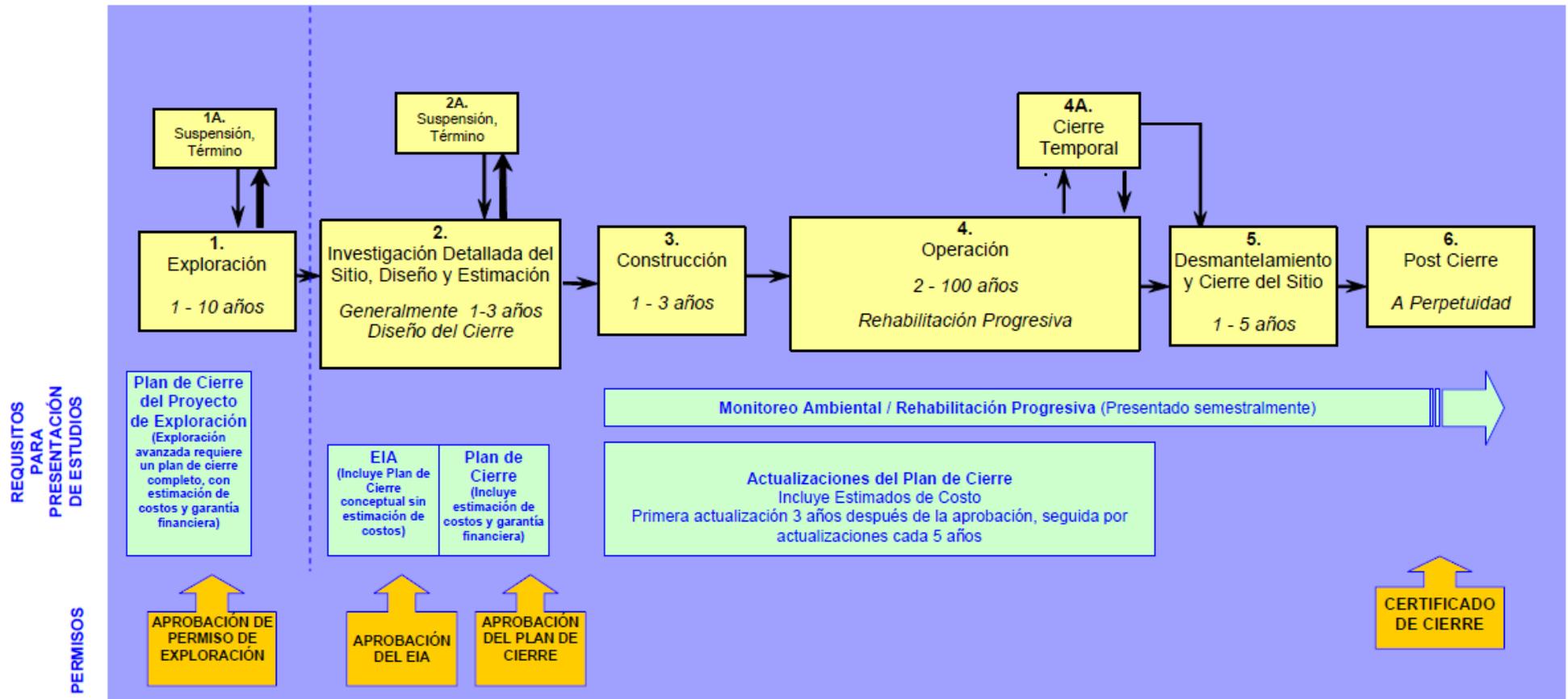


Figura 2: Estudios ambientales y escenarios de cierre durante el desarrollo de la mina (MINEM 2006)

## 2.2 RIESGO

La Organización Internacional de Normalización (ISO) en el año 2009 **presenta** un nuevo concepto de riesgo definido como el efecto de la incertidumbre sobre los objetivos. El efecto es una desviación de lo esperado, positivos y/o en contra. Los objetivos pueden presentarse bajo distintas formas (como servicios financieros, salud y seguridad, y las metas ambientales) y puede se aplican a niveles diferentes (como proyecto estratégico, en toda la organización, productos y procesos). Riesgo a menudo se caracterizan por hacer referencia a los eventos potenciales y consecuencias, o una combinación de éstos. El riesgo se expresa a menudo en términos de una combinación de las consecuencias de un evento (incluyendo los cambios en circunstancias) y la probabilidad asociada de ocurrencia. La incertidumbre es el estado total o parcial de deficiencia de información relacionada con la comprensión o el conocimiento de un caso, su consecuencia, o la probabilidad. En el Anexo 2 se adjuntan las definiciones más relevantes mencionadas en el presente estudio.

El Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM 2008) define que el riesgo es una medida de la probabilidad de que una consecuencia específica pueda suceder, riesgo residual es el nivel más bajo del riesgo logrado por un conjunto dado de medidas de gestión, probabilidad es una descripción general de probabilidad o frecuencia, consecuencia es el resultado o el impacto de un evento, evento es el suceso producido por un conjunto particular de circunstancias.

David Hillson y David Hulett (2004) concluyen que el riesgo se define con dos dimensiones, la de incertidumbre (evaluada como probabilidad de ocurrencia), y el efecto dimensión (evaluado como impacto en los objetivos). El cálculo correcto de riesgos requiere la evaluación apropiada, tanto de la probabilidad como del impacto.

El Reglamento para el Cierre de Minas (MINEM 2005), norma en su primer artículo el objeto del mismo es el control de los riesgos y efectos sobre la salud, seguridad, ambiente, ecosistema y propiedad, que pudieran derivarse del cese de las operaciones de una unidad minera.

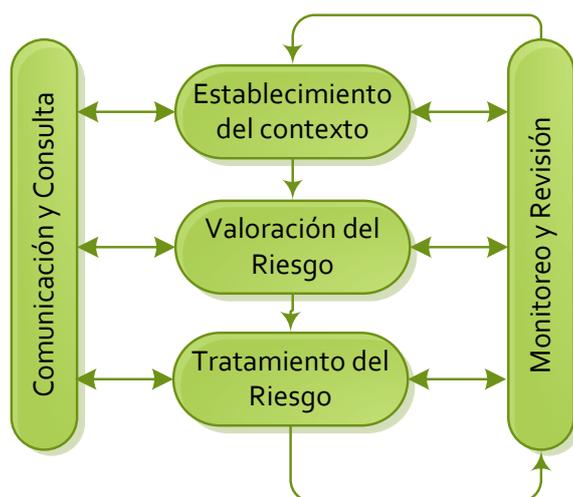
Durante las operaciones mineras, el Reglamento para el Cierre de Minas (MINEM 2005) justifica que se proceda a paralización (escenario de cierre temporal) a los componentes

que estuvieren involucrados con operaciones que presenten riesgo inminente a la seguridad, salud y medio ambiente.

Acerca del contenido del Plan de Cierre, el Reglamento para el Cierre de Minas (MINEM 2005) establece en su artículo décimo, el mismo deberá sujetarse a la atención prioritaria de los componentes de mayor riesgo.

### 2.2.1 GESTIÓN DEL RIESGO

La ISO (2009) define a la gestión del riesgo como el conjunto de actividades coordinadas para dirigir y controlar una organización con respecto al riesgo. Aplicación sistemática de actividades de establecimiento del contexto, valoración y tratamiento del riesgo, retroalimentado de inicio a fin por procesos de comunicación, consulta, monitoreo y revisión del riesgo como se muestra en la Figura 3.



**Figura 3: Proceso de gestión de riesgos (ISO 2009)**

#### 2.2.1.1 Gestión de riesgo en la minería

En relación a información adicional requerida para la elaboración del plan de cierre, el Ministerio de Energía y Minas (2006) afirma que, en determinados casos podría ser necesaria la evaluación de alternativas para aquellos componentes que representen mayor riesgo para la seguridad, salud o el ambiente y que para tal selección sea considerado los enfoques técnico, económico, ambiental y social.

En la actualización final del plan de cierre, el Ministerio de Energía y Minas (2006) requiere que se deba evaluar los riesgos relacionados con los componentes que no hayan sido sometidos a cierre progresivo. Para este efecto se deberán establecer especificaciones detalladas de las tareas de cierre, realizar procesos de consulta en relación al cierre de mina y evaluar cualquier cambio en el plan de operaciones ocurrido durante la vida de la mina.

La clasificación de componentes mineros para la planificación de cierre minero ha sido establecida por el MINEM (2006), tal como se presenta en el Tabla 1.

**Tabla 1: Clasificación de componentes mineros**

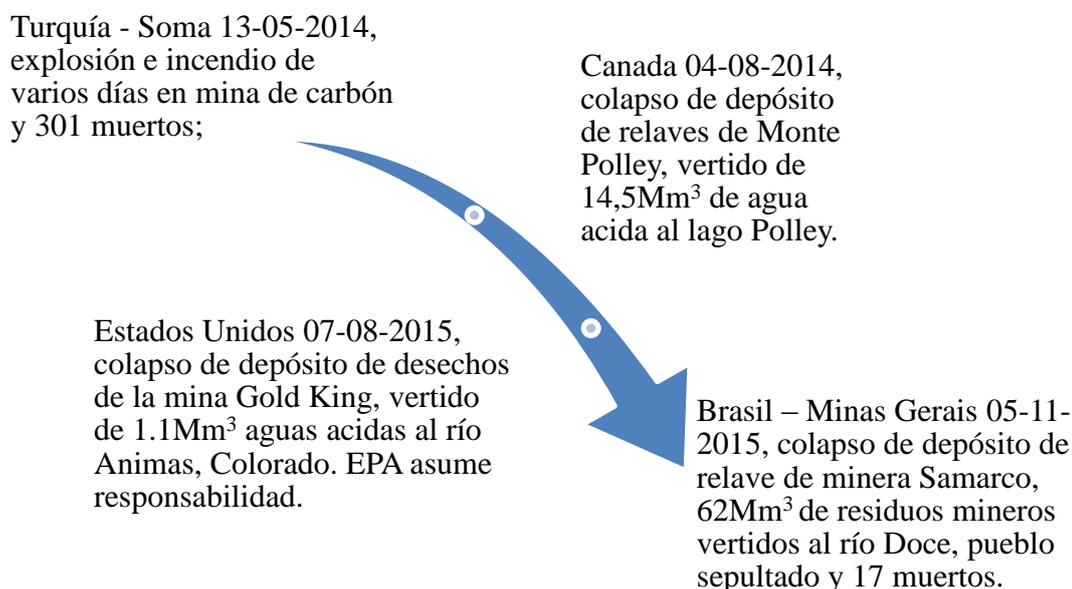
Componentes mineros	
Mina	
-	Labores subterráneas
-	Tajos abiertos
Instalaciones de procesamiento	
-	Pilas de lixiviación
-	Botaderos de lixiviación
Instalaciones para el manejo de residuos	
-	Depósitos de relaves
-	Botaderos de desmonte
Instalaciones para el manejo de aguas	
-	Infraestructura para el suministro de agua
-	Sistema de manejo de aguas pluviales
Áreas para el material de préstamo	
Otras infraestructuras relacionadas con el proyecto	
Vivienda y servicios para los trabajadores	
Fuera laboral y adquisiciones	
-	Fuerza laboral
-	Adquisición de bienes y servicios

Fuente: MINEM (2006)

Luego del análisis de 363 casos de minería, Rodríguez et al. (2009) concluye que las principales causas de desastres son:

- falta o deficiente estudio de impacto ambiental (EIA),
- fallo de las estructuras de almacenamiento de residuos (instalaciones, presas, escombreras y pilas de lixiviación, etc.),
- falta de aplicación de mejores técnicas disponibles para explotaciones mineras,
- errores en el diseño de las instalaciones,
- falta de medidas de protección adecuadas en función de los riesgos existentes.

Así se muestra en la figura y en el Anexo 3 se listan eventos desastrosos desde el año 1941 al 2015 en minería:



**Figura 4: Desastres en la minería en años 2014 y 2015**

Así pues se denota que la experiencia de varias unidades mineras destaca a ciertos componentes mineros que requieren mayor atención de análisis de riesgo por el elevado nivel de consecuencia de fallos. En el Tabla 2 se presentan seis de componentes mineros considerados como prioritarios en el análisis de riesgos.

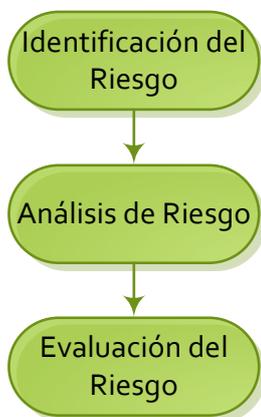
**Tabla 2: Componentes mineros de mayor riesgo**

Componentes mineros
Labores subterráneas
Tajos abiertos
Depósitos de relaves (diques, embalse, espesados, en pasta, filtrados y toda tipo de relaves)
Botaderos de lixiviación (ripios)
Botaderos de desmonte (estéril, lastre y material de baja ley)
Depósitos de escorias de fundición

Fuente: Arcadis/SERNAGEOMIN (2014)

## 2.2.2 VALORACIÓN DEL RIESGO

La ISO (2009) define a la valoración del riesgo como el proceso general de identificación de riesgo, análisis de riesgo y de evaluación de riesgos, tal como se muestra en la Figura 4.



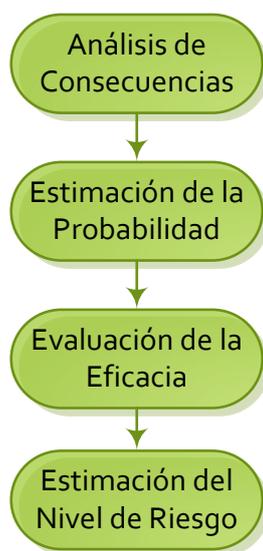
**Figura 5: Proceso de valoración de riesgos (ISO 2009)**

La organización Ambiente Seguro (ENVSEC), en su libro “Mining for closure” (minería para cierre), recomienda que dentro de los pasos a seguir para iniciar el proyecto de construcción de una mina, deberá enfocarse en la evaluación de impactos ambientales y la evaluación de riesgos.

El Ministerio de Energía y Minas (2010) establece que la evaluación de riesgos es un proceso posterior a la identificación de los peligros, que permite valorar el nivel, grado y gravedad de aquellos, proporcionando la información necesaria para que el titular y el trabajador minero estén en condiciones de tomar una decisión apropiada sobre la oportunidad, prioridad y tipo de acciones preventivas que debe adoptar, con la finalidad de eliminar la contingencia o la proximidad de un daño.

## 2.3 ANÁLISIS DE RIESGOS

La ISO (2009) define al análisis de riesgo como el proceso de comprender la naturaleza del riesgo y para determinar el nivel de riesgo. Está constituida por cuatro subprocesos, análisis de consecuencias, estimación de la probabilidad, evaluación de la eficacia, estimación del nivel de riesgo, tal como se muestra en la Figura 5.



**Figura 6: Proceso de análisis de riesgos (ISO 2009)**

Según la ISO (2009) el análisis de riesgos tiene los siguientes atributos:

- consiste en desarrollar una mayor comprensión del riesgo;
- proporciona una entrada al riesgo evaluación y las decisiones sobre si los riesgos deben ser tratados, sobre las estrategias y métodos de tratamiento de riesgo más apropiadas;
- contribuye en la toma de decisiones en las que las opciones implican diferentes tipos y niveles de riesgo;
- implica la consideración de las causas y las fuentes de riesgo, sus consecuencias positivas, negativas y la probabilidad de que esas consecuencias pueden ocurrir, factores que afectan a las consecuencias y riesgo deben ser identificados;
- analiza mediante la determinación de las consecuencias, su probabilidad y otros atributos del riesgo; un evento puede tener múltiples consecuencias y puede afectar a múltiples objetivos, controles existentes, su eficacia y eficiencia también debe tenerse en cuenta.

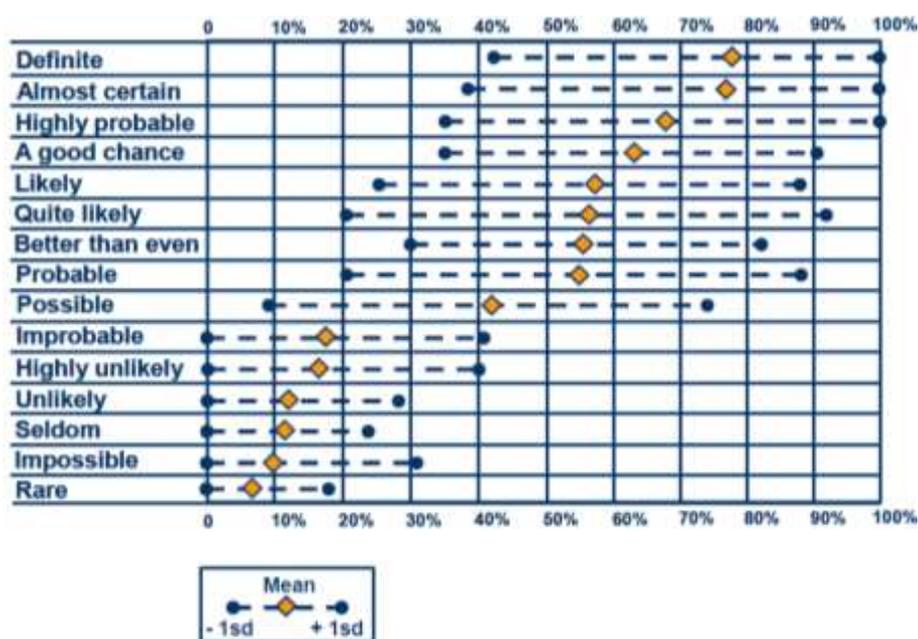
- la forma en que se combinan y expresan las consecuencias y la probabilidad debe reflejar el tipo de riesgo;
- la información disponible y el propósito para el cual el resultado de la evaluación de riesgos se va a utilizar, deberán ser coherentes con los criterios de riesgo;
- se debe considerar la interdependencia de los distintos riesgos y sus fuentes;
- la confianza en la determinación del nivel de riesgo, su sensibilidad a las condiciones previas y las hipótesis deben ser considerados en el análisis, y comunicarse eficazmente a los tomadores de decisiones, dependiendo del caso, otros las partes interesadas;
- factores tales como la divergencia de opinión entre los expertos, la incertidumbre, la disponibilidad, calidad, cantidad y la pertinencia permanente de información, o las limitaciones en el modelado debería ser especificado y puede ser destacada;
- puede llevarse a cabo con diferentes grados de detalle, en función del riesgo, el objetivo del análisis, y la información, datos y recursos disponibles;
- puede ser cualitativo, semicuantitativo o cuantitativos, o una combinación de ambos, dependiendo de las circunstancias;
- las consecuencias y la probabilidad se pueden determinar mediante el modelado de los resultados de un evento o una serie de eventos, o mediante la extrapolación de estudios experimentales o de los datos disponibles;
- las consecuencias pueden ser expresadas en términos de efectos tangibles e intangibles;
- en algunos casos, más de un valor es numérico o descriptor necesarios para especificar las consecuencias y la probabilidad de diferentes épocas, lugares, grupos o situaciones.

El estudio de David Hillson y David Hulett (2004) concluyen que el efecto en los objetivos es relativamente simple de estimar, ya que envuelve un simple ejercicio consistente en imaginar la situación donde el riesgo sucede. Calcular la probabilidad de ocurrencia es lo complicado. Por lo cual la estimación de la probabilidad siempre requerirá mayor atención.

Sin embargo la gestión de cierre de minas no especifica las pautas para la valoración y análisis de riesgos respectivos.

### 2.3.1 ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD

Los estudios realizados por Hillson et al. (2004), demuestran el aporte subjetivo de la ambigüedad en los términos usados para categorizar la probabilidad en el método de estimación definitorio (bandas desde imposible hasta certeza total), mostrados en la Figura 6 y su traducción presentada en el Tabla 3.



**Figura 7: Interpretación de términos relativos a probabilidades (Hillson et al. 2004)**

**Tabla 3: Traducción de términos relativos a probabilidades**

Término	Traducción	Nota del traductor
Definite	Positivo o definitivamente	<i>La traducción se hizo con términos comunes de probabilidades, en el idioma inglés. Los distintos términos traducidos al español podrían tener una ligera diferencia en significado, para un grupo de habla hispana a quien se pudiese encuestar de la misma manera que se hizo en inglés, y por tanto el experimento podría arrojar algunas diferencias en los resultados.</i>
Almost certain	Con casi total certeza	
Highly probable	Altamente probable	
A good chance	Con buen chance	
Likely	Muy probable	
Quite likely	Bastante probable	
Better tan even	Mejor que mitad y mitad	
Probable	Probable	
Possible	Posible	
Improbable	Improbable	
Highly unlikely	Muy poco probable	
Unlikely	Poco probable	
Seldom	Rara vez	
Impossible	Imposible	
Rare	Poco común o raro	

Fuente: Hillson et al. (2004) y traducción al español 2004 por Jorge Alsina, PMP

Asimismo el método de estimación comparativo en el cual se comparan las probabilidades una con otra preguntando si la probabilidad del riesgo que está sucediendo es más, o menos, o tiene el mismo valor que la que se está presentando (a modo de apuestas, orientado según su valor y posibilidad relativa), lo cual está particularmente sujeto a sesgos perceptivos y heurísticos. Sin embargo el método de estimación de estado natural deduce probabilidades de riesgo a partir de la descripción del estado de una variable relacionada con proyectos; incluye la descripción de rangos de situaciones o escenarios alternos que pudieran ocurrir para una fuente de riesgos dada dentro del historial del proyecto o proyectos con las mismas variables. Este método tiene la ventaja de ser menos subjetivo porque la situación se compara con un conjunto de alternativas definidas, objetivas y hechos conocidos.

El estudio de David Hillson y David Hulett (2004) concluye que para asegurar una evaluación más robusta de las probabilidades de riesgos, se recomienda una solución compuesta de dos partes. La primera parte requiere una conciencia de los problemas, incluyendo la comprensión de los problemas asociados con el cálculo de probabilidades, el efecto de influencias psicológicas, la importancia de una evaluación confiable de probabilidades, y los distintos métodos alternos disponibles. Todo esto debe venir acompañado por acciones para enfrentar los temas preocupantes, identificando y gestionando las fuentes de sesgo (tanto perceptivas como heurísticas), modificando las prácticas utilizando diferentes técnicas de cálculo de probabilidades, vigilando el desempeño de subsecuentes proyectos y gestión de riesgos, para determinar la exactitud de la probabilidades calculadas de riesgos, y aprendiendo lecciones para mejorar aún más la efectividad del proceso de evaluación de riesgos.

### **2.3.2 SELECCIÓN DE MÉTODOS DE ANÁLISIS DE RIESGO**

Se han diseñado diversas técnicas para análisis de riesgo reconocidas por la IEC, es por ello que para una efectiva aplicabilidad se debe considerar atributos de aplicabilidad de las técnicas en el proceso de valoración del riesgo (identificación del riesgo, consecuencia, probabilidad, nivel de riesgo y evaluación de riesgo), recursos y capacidades, naturales y grado de la incertidumbre, complejidad, puede dar resultados cuantitativos, tal como se presenta en el Tabla 4.

De los cuales se seleccionó la metodología denominada análisis de los modos de fallo, efecto y criticidad (FMECA), debido a sus siguientes atributos:

- según la IEC (2009) es la técnica recomendable de análisis funcional que conforma la técnica de mantenimiento basado en la fiabilidad (RCM), la cual es ideal para establecer un programa de mantenimiento de las estructuras de componentes en cierre final;
- su complejidad del problema y de los métodos que se necesitan para analizarlo, es media;
- la naturaleza y el grado de incertidumbre de la valoración del riesgo, basados en la cantidad de información disponible y que se requiere para satisfacer los objetivos, son de nivel medio;
- la amplitud de los recursos requeridos en función del tiempo y del nivel de conocimientos técnicos, de las necesidades de datos o de los costes, son de nivel medio;
- el método puede proporcionar un resultado cuantitativo y;
- es muy aplicable en todo el proceso de valoración de riesgo;

Asimismo, se selecciona la metodología denominada análisis de decisión multicriterio (MCDA), debido a sus siguientes atributos:

- según la IEC (2009) es la técnica que nos permite incluir dentro del análisis varios criterios técnicos, los cuales serán fundamentales para la toma de decisión en la categorización de la severidad de la consecuencia y riesgos;
- es muy aplicable para definir y categorizar el nivel de riesgo;
- es muy aplicable en todo el proceso de análisis de consecuencias.

**Tabla 4: Atributos para selección de metodologías de análisis de riesgo**

<b>Herramientas y técnicas</b>	Identificación del riesgo	Consecuencia	Probabilidad	Nivel del riesgo	Evaluación del riesgo	Recursos y capacidades	Naturaleza y grado de la incertidumbre	Complejidad	¿Puede dar resultados cuantitativos?
MA: Muy aplicable NA: No aplicable A: Aplicable									
<b>Métodos de búsqueda</b>									
Listas de verificación	MA	NA	NA	NA	NA	Bajo	Baja	Baja	No
Análisis preliminar de peligros (PHA)	MA	NA	NA	NA	NA	Bajo	Alto	Media	No
<b>Métodos de apoyo</b>									
Entrevistas estructuradas o semiestructuradas	MA	NA	NA	NA	NA	Bajo	Baja	Baja	No
Delphi	MA	NA	NA	NA	NA	Medio	Media	Media	No
Técnica estructurada “y si...” (SWIFT)	MA	MA	MA	MA	MA	Medio	Media	Alguna	No
Análisis de la fiabilidad humana (HRA)	MA	MA	MA	MA	A	Medio	Media	Media	Si
<b>Análisis de escenario</b>									
Análisis de la causa raíz (RCA)	MA	MA	MA	MA	MA	Medio	Baja	Media	No
Análisis de escenario	MA	MA	A	A	A	Medio	Alta	Media	No
Valoración de la toxicidad	MA	MA	MA	MA	MA	Alto	Alta	Media	Si
Análisis de impacto en el negocio (BIA)	A	MA	A	A	A	Medio	Media	Media	No
Análisis del árbol de fallos (FTA)	A	NA	MA	A	A	Alto	Alta	Media	Si
Análisis del árbol de sucesos (ETA)	A	MA	A	A	NA	Medio	Media	Media	Si
Análisis de causa – consecuencia	A	MA	MA	A	A	Alto	Media	Alta	Si
Análisis de causa y efecto	MA	MA	NA	NA	NA	Bajo	Baja	Media	No
<b>Análisis funcional</b>									
Análisis de modos de fallo, efectos/y criticidad (FMEA/FMECA)	MA	MA	MA	MA	MA	Medio	Media	Media	Si
Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)	MA	MA	MA	MA	MA	Medio	Media	Media	Si
Análisis de fugas (SA) y análisis de circuito de fuga (SCA)	A	NA	NA	NA	NA	Medio	Media	Media	No
Análisis de riesgos y de operatividad (HAZOP)	MA	MA	A	A	A	Medio	Alta	Alta	No
Análisis de riesgos y puntos de control críticos (HACCP)	MA	MA	NA	NA	MA	Medio	Media	Media	No

“... continuación”

<b>Herramientas y técnicas</b>	Identificación del riesgo	Consecuencia	Probabilidad	Nivel del riesgo	Evaluación del riesgo	Recursos y capacidades	Naturaleza y grado de la incertidumbre	Complejidad	¿Puede dar resultados cuantitativos?
<b>MA: Muy aplicable</b> <b>NA: No aplicable</b> <b>A: Aplicable</b>									
<b>Apreciación de los controles</b>									
Análisis de capas de protección (LOPA)	A	MA	A	A	NA	Medio	Media	Media	Si
Análisis de pajarita	NA	A	MA	MA	A	Medio	Alta	Media	Si
<b>Métodos estadísticos</b>									
Análisis Markov	A	MA	NA	NA	NA	Alto	Baja	Alta	Si
Simulación de Monte Carlo	NA	NA	NA	NA	MA	Alto	Baja	Alta	Si
Estadísticas y redes Bayesianas	NA	MA	NA	NA	MA	Alto	Baja	Alta	Si
<b>Otras herramientas reconocidas</b>									
Tormenta de ideas	MA	NA	NA	NA	NA	-	-	-	-
Análisis del árbol de decisiones	NA	MA	MA	A	A	-	-	-	-
Curvas FN	A	MA	MA	A	MA	-	-	-	-
Índices de riesgo	A	MA	MA	A	MA	-	-	-	-
Matriz de consecuencia/probabilidad	MA	MA	MA	MA	A	-	-	-	-
Análisis de costes/beneficios (CBA)	A	MA	A	A	A	-	-	-	-
Análisis de decisión multi – criterios (MCDA)	A	MA	A	MA	A	-	-	-	-

Fuente: IEC/ISO 31010:2009

### **2.3.3 ANÁLISIS DE LOS MODOS DE FALLO, EFECTOS Y CRITICIDAD**

Según la IEC (2009) es una técnica que se utiliza para identificar las vías por las que los componentes, sistemas, o procesos pueden fallar en cuanto a cumplir los objetivos de su diseño. El análisis de modos de fallo, efectos y criticidad (FMECA) identifica:

- Todos los posibles modos de fallo de las diversas partes de un sistema (un modo de fallo es lo que se observa que falla o que funciona incorrectamente);
- los efectos que estos fallos pueden tener sobre el sistema;
- los mecanismos de fallo;
- cómo evitar los fallos, y/o mitigar los efectos de los fallos sobre el sistema y;
- jerarquías asignables a cada modo de fallo en función de importancia o criticidad

#### **2.3.3.1 Utilización**

La IEC (2009) afirma que el FMECA se puede aplicar durante el diseño, fabricación o el funcionamiento de un sistema físico. No obstante, para mejorar la confiabilidad son más fáciles de implantar en la etapa de diseño. También se pueden aplicar a procesos y procedimientos. Ejemplos: identificar el potencial del error médico en sistemas de atención médica, fallos en los procedimientos de mantenimiento, etc. El FMECA se puede usar para:

- Ayudar en la selección de alternativas de diseño con una alta confiabilidad;
- asegurar que se han considerado todos los modos de fallo de sistemas y procesos, sus efectos sobre el éxito operacional;
- identificar los modos de fallo de errores humanos y sus efectos;
- disponer de una base para planificar los ensayos y el mantenimiento de sistemas físicos;
- mejorar el diseño de los procedimientos, procesos y;
- proporcionar información cualitativa o cuantitativa de técnicas de análisis de árbol de fallos, entre otros.

### 2.3.3.2 Elementos de entrada

Según la IEC (2009), el análisis FMECA necesita información acerca de los elementos del sistema con detalle suficiente para el análisis significativo de las vías en que cada elemento puede fallar. Para un FMECA de diseño detallado, el elemento puede estar a nivel de componente individual detallado, mientras que para un FMEA de diseño de nivel global, los elementos se pueden definir a un nivel global. La información puede incluir:

- Planos o flujogramas del sistema que se está analizando y de sus componentes, o los pasos de un proceso;
- una comprensión de la función de cada paso de un proceso o componente de un sistema;
- detalles de los parámetros ambientales y de otros tipos, que puedan afectar al funcionamiento;
- una comprensión de los resultados de fallos particulares;
- información histórica de los fallos, incluyendo los datos de las tasas de fallo, cuando estén disponibles.

### 2.3.3.3 Proceso

Según la IEC (2009), el análisis FMECA consiste en:

- Definición del campo de aplicación y los objetivos del estudio;
- composición del equipo de trabajo;
- comprensión del sistema/proceso que se va a someter al FMECA;
- descomposición del sistema en sus componentes o pasos;
- definición de la función de cada paso o componente;
- para cada componente o paso listado, identifica: ¿cómo puede fallar cada parte de una forma concebible? ¿qué mecanismos podrían producir estos modos de fallo? ¿cuáles serían los efectos si se produjese el fallo? ¿es el fallo inofensivo o dañino? ¿cómo se detecta el fallo?
- identificación de las disposiciones inherentes al diseño para compensar el fallo;
- clasificación de cada uno de los modos de fallo identificados en función de su criticidad, para ello se pueden usar los métodos siguientes: el índice de criticidad del modo de fallo, el nivel de riesgo y, la prioridad de riesgo,

La criticidad modelo es una medida de la probabilidad de que el modo de fallo que se está considerando produzca un fallo en el sistema considerando en su conjunto; definido en la siguiente Figura 7:

Criticidad	=	Probabilidad del efecto de fallo	×	Régimen del modo de fallo	×	Tiempo de funcionamiento del sistema
------------	---	----------------------------------	---	---------------------------	---	--------------------------------------

**Figura 8: Modelo de criticidad (IEC 2009)**

Se aplica con más frecuencia a los modos de fallo del equipo en los que cada uno de los términos se puede definir cuantitativamente y todos los modos de fallo tienen las mismas consecuencias.

El nivel de riesgo se obtiene combinando las consecuencias de un modo de fallo que ocurre, con la probabilidad del fallo. Se utiliza cuando las consecuencias de modos de fallo diferentes son distintas y se pueden aplicar a sistemas o procesos de equipos. El nivel de riesgo se puede expresar de forma cualitativa, semicuantitativa o cuantitativa.

El número de prioridad del riesgo (RPN) es una medida semicuantitativa de la criticidad, que se obtiene multiplicando números de las escalas de clasificación (normalmente entre uno a diez) por la consecuencia del fallo, la probabilidad de fallo y la aptitud para detectar el problema (así tenemos que para un fallo se le da una prioridad más alta si es difícil de detectar). Este es el método se utiliza con mucha frecuencia en aplicaciones de aseguramiento de la calidad.

Una vez que los modos de y mecanismos de fallo han sido identificados, las acciones se pueden definir e implantar para los modos de fallo más importantes.

El FMECA se documenta en un enfoque que contiene:

- detalles del sistema que se ha analizado;
- forma en que se realizó el análisis;
- suposiciones efectuadas en el análisis;
- orígenes de los datos;
- resultados, incluyendo las fichas de trabajo complementarias;
- la criticidad (si se completado) y la metodología aplicada para definirla;

- todas las recomendaciones para análisis adicionales, los cambios o características de diseño a incorporar en los planes de ensayo, etc.

El sistema se puede volver a someter a apreciación para otro ciclo de análisis FMECA, una vez que se hayan completado las acciones.

#### **2.3.3.4 Resultados**

Según la IEC (2009), el resultado principal del análisis FMECA consiste en una lista de modos de fallo y de los mecanismos y efectos de fallo para cada componente o paso de un sistema o proceso (que puede incluir información sobre la probabilidad del fallo). También proporciona información sobre las causas del fallo y las consecuencias para el sistema considerado en su totalidad. La salida del análisis FMECA incluye una clasificación de la importancia basada en la probabilidad de que el sistema falle, en el nivel de riesgo resultante del modo de fallo o en una combinación del riesgo y la detectabilidad del modo de fallo.

El FMECA puede dar una salida cuantitativa si se utilizan datos adecuado de la tasa de fallos y consecuencias cuantitativas.

#### **2.3.3.5 Fortalezas y limitaciones**

Fortalezas según la IEC (2009):

- ampliamente aplicables a modos de fallo de personas, equipos, sistemas, hardware, software y procedimientos;
- identifican los modos de fallo de los componentes, sus causas y sus efectos sobre el sistema, y los presentan en un formato fácilmente legible;
- evitan la necesidad de costosas modificaciones del equipo en servicio, mediante la identificación temprana en el proceso de diseño;
- identifican modos de fallo de un solo punto y los requisitos, por redundancia o mediante sistemas de seguridad;
- proporcionan la entrada para el desarrollo de programas de seguimiento, realizando las características importantes para realizar el seguimiento.

Limitaciones según la IEC (2009):

- estos análisis únicamente se pueden utilizar para identificar modos de fallos únicos, y no combinaciones de modos de fallo;
- salvo que se controlen y enfoquen adecuadamente, los estudios pueden ocupar mucho tiempo y ser costosos;
- pueden ser difíciles y tediosos para sistemas complejos de muchas etapas.

Heikkinen et al. (2008) señala que hay varios métodos disponibles para la evaluación de riesgos, entre ellos el análisis FMECA, sin embargo más importante que la selección del método de análisis de riesgo, es realizar la evaluación de modo sistemático con personas que tengan la suficiente experiencia, criterio y actitud objetiva o sin prejuicios.

Szymanski et al. (2004), considera al FMECA como herramienta de evaluación de riesgos rigurosa para una aproximación de enfoque aceptable durante del diseño de presas de relave.

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013) normaliza como alternativa al método FMECA como un método de comprobación sistemática detallada para efectuar evaluaciones de seguridad operacional para proveedores de servicios de tránsito aéreo y explotadores de aeródromos.

El estudio realizado por Robertson y Shaw (2006) confirma que el FMECA aborda principalmente el riesgo de diseños y procedimientos de operación que no han sido alcanzados en los objetivos del diseño.

Collantes (2013) concluye en la importancia de manejar el historial de fallas o data de vida de los diferentes equipos para hacer un análisis. Así como la integración de las decisiones de mantenimiento y configuración de las operaciones para una mejor solución.

Arratia (2015) utiliza FMECA como una herramienta dentro de la gestión temprana del mantenimiento la cual permite la plena seguridad que el mantenimiento de dichos activos es el óptimo, asegurando la continuidad operacional (entiéndase como funcionalidad) de los ciclos productivos y agilizando la obtención de beneficios económicos esperados.

#### **2.3.4 ANALISIS DE DECISIÓN MULTICRITERIO**

Según la IEC (2009), el objetivo de este análisis es utilizar una gama de criterios para apreciar de forma objetiva y transparente el mérito de un conjunto de opciones. En general, la meta global es generar un orden de preferencia entre opciones disponibles. Este análisis implica el desarrollo de una matriz de opciones de criterios que se jerarquizan y suman para proporcionar una puntuación global de cada opción.

##### **2.3.4.1 Utilización**

Según la IEC (2009), el análisis de decisión multicriterio (MCDA) se puede utilizar para:

- comparar múltiples opciones como un primer paso de análisis para determinar opciones preferentes, potenciales e inapropiadas;
- comparar opciones cuando existen múltiples criterios, que algunas veces son contradictorios;
- alcanzar un consenso sobre una decisión cuando diferentes partes interesadas tienen objetivos o valores contradictorios.

##### **2.3.4.2 Elementos de entrada**

Según la IEC (2009), un conjunto de opciones para el análisis. Los criterios, basados en objetivos, que se pueden utilizar por igual sobre todas las opciones para establecer las diferencias entre ellas.

##### **2.3.4.3 Proceso**

Por lo general, un grupo de partes interesadas bien informadas que realizan el proceso siguiente:

- definen el o los objetivos;
- determinan los atributos (criterios o medidas de comportamiento) que se relacionan con cada objetivo;
- estructuran los atributos de manera jerárquica;
- desarrollan opciones que se evalúan contra los criterios fijados;

- determinan la importancia de los criterios y le asignan las categorías correspondientes;
- evalúan las alternativas con respecto a los criterios. Esto se puede representar como una matriz de puntuaciones;
- combinan las múltiples puntuaciones de un solo atributo en una puntuación única de múltiples atributos;
- evalúan los resultados.

Existen diferentes métodos mediante los cuales se puede obtener la ponderación de cada criterio, y diferentes formas de sumar los criterios de cada opción en una puntuación única de múltiples atributos. Por ejemplo, las puntuaciones se pueden sumar como una suma ponderada o un producto ponderado o utilizando un proceso jerárquico analítico, una técnica de consecución de las ponderaciones y puntuaciones basadas en comparaciones por parejas. En todos estos métodos se asume que la preferencia por cualquier criterio no depende de los valores de los otros criterios. Cuando esta presunción no es válida, se utilizan modelos diferentes. Dado que las puntuaciones son subjetivas, el análisis de sensibilidad es útil para examinar el alcance con que las ponderaciones y las puntuaciones influyen en las preferencias generales entre opciones.

#### **2.3.4.4 Resultados**

Según la IEC (2009), la presentación del orden jerárquico de las opciones va desde la más a la menos preferida. Si el proceso genera una matriz donde los ejes de la matriz son los criterios ponderados y los criterios de puntuación para cada opción, entonces también se pueden eliminar las opciones que fallen criterios altamente ponderados.

#### **2.3.4.5 Fortalezas y limitaciones**

Fortalezas según la IEC (2009):

- proporciona una estructura simple para una toma de decisiones eficaz y la presentación de presunciones y de conclusiones;
- puede hacer más manejables los problemas decisión complejos que no son tratables mediante el análisis de costes/beneficios;

- puede ayudar a considerar racionalmente los problemas donde es necesario realizar concesiones mutuas;
- puede ayudar a conseguir el acuerdo entre partes interesadas que tienen objetivos diferentes y por tanto también criterios diferentes.

Limitaciones según la IEC (2009):

- puede ser afectado por derivaciones y una mala selección de los criterios de decisión;
- la mayoría de los problemas del MCDA no tienen una solución concluyente o única;
- los algoritmos de agregación que calculan los criterios de las ponderaciones a partir de las preferencias establecidas o las opiniones que difieren totalmente, pueden oscurecer la base de la verdadera decisión.

### **2.3.5 PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO**

El proceso de análisis jerárquico (AHP) es un análisis de decisión multicriterio; el SERNAGEOMIN/Arcadis (2014) recomienda a través de su análisis a varias unidades mineras que a pesar de contar con un correcto diseño durante la implementación, dependerá de una adecuada construcción y posterior operación el alcanzar los objetivos de estabilidad física y química en condición de cierre. Significa que una instalación minera puede haberse diseñado con ciertas características y bajo condiciones de operación que, durante la vida útil no es posible alcanzar por diversas razones, en cuyo caso un buen diseño se ve necesariamente afectado por una incorrecta operación lo que podría derivar en la aparición de algún riesgo significativo.

Por lo cual SERNAGEOMIN/Arcadis (2014) define que para evaluar los riesgos de una determinada instalación minera en condición de cierre, se debe incorporar no sólo los criterios de diseño sino que ciertos factores técnicos propios de la operación.

El CENEPREDED (2014) cita el proceso de análisis jerárquico (AHP – Analytic Hierarchy Process) desarrollado por el matemático Thomas L. Saaty (1980) diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples mediante la construcción de un modelo jerárquico que le permite estructurar el problema de forma visual.

El AHP permite combinar lo objetivo, tangible y racional de la ciencia clásica con lo subjetivo, intangible y emocional del comportamiento humano. En este sentido, se puede conseguir un tratamiento objetivo de lo subjetivo (Keeney, 1992).

El punto central del AHP es el proceso de asignar ponderación a los parámetros y descriptores relacionados con una decisión y la calificación final de las diferentes alternativas respecto de los criterios seleccionados.

Toskano (2005) afirma algunas de las ventajas del AHP frente a otros métodos de decisión multicriterio y son:

- Presenta un sustento matemático;
- permite desglosar y analizar un problema por partes;
- permite medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común;
- incluir la participación de equipos multidisciplinarios y generar un consenso;

- permite verificar el índice de consistencia y hacer las correcciones, si fuere el caso;
- generar una síntesis y dar la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad;
- ser de fácil uso y permitir que su solución se pueda complementar con métodos matemáticos de optimización.

Para la estimación del valor de la importancia relativa de cada uno de los indicadores se recurre a una metodología de comparación de pares (Saaty, 1990) por sus ventajas, flexibilidad y por la facilidad de involucrar a todos los actores en el proceso de decisión (Garfi et al., 2011), la escala de importación relativa se presenta en el Tabla 5.

**Tabla 5: Escala de importancia relativa de criterios**

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
9	Absolutamente o muchísimo más importante que...	Al comparar un elemento con otro el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo.
7	Mucho más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con otro el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante o preferido que el segundo.
5	Mas importante o preferido que...	Al comparar un elemento con otro el primero se considera más importante o preferido que el segundo.
3	Ligeramente más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con otro, el primero es ligeramente más importante o preferido que el segundo.
1	Igual o diferente a...	Al comparar un elemento con otro, hay indiferencia entre ellos.
1/3	Ligeramente menos importante o preferido que...	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera ligeramente menos importante o preferido que el segundo.
1/5	Menos importante o preferido que...	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera menos importante o preferido que el segundo.
1/7	Mucho menos importante o preferido que...	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera mucho menos importante o preferido que el segundo.
1/9	Absolutamente o muchísimo	Al comparar un elemento con otro el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes, que se emplean cuando es necesario un término medio entre dos de las intensidades anteriores.	

Fuente: Saaty (1980)

Saaty desarrolló la relación de consistencia (RC) calculada por la razón entre el índice de consistencia (IC) y el índice aleatorio de una matriz de comparaciones pareadas (IA). La

cual nos indica que los criterios utilizados para la comparación de pares son los más adecuados.

El factor técnico se calcula a través de la sumatoria de productos de pesos ponderados de criterios ( $P_{1n}$ ) y valores de criterios ( $V_n$ ), denotado de modo general por:

$$FT = \sum_{i=1}^n P_{1n} \times V_n$$

El proceso de análisis jerárquico (Saaty, 1980) permite obtener la ponderación de diferentes variables independientes entre sí, así como la consistencia del mismo en base al cálculo de la relación de consistencia (RC) que permite la verificación de la posible existencia de consistencia entre los juicios expresados, denotados por:

$$P_{1n} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{nj}$$

$$RC = IC/IA$$

### **2.3.5.1 Valores de criterios ( $V_n$ )**

En función a la experiencia de mantenimiento y el diseño de los componentes se elabora un Tabla de doble entrada en cuales cada fila corresponderá a criterios técnicos varios y cada columna corresponderá a 5 categorías de valores de criterios los cuales serán 0; 0,25; 0,5; 0,75 y 1.

### **2.3.5.2 Pesos ponderados ( $P_{1n}$ )**

Como base se usa una matriz de comparaciones pareadas, la cual es una matriz cuadrada es decir el mismo número de filas y columnas, la que muestra los pares de comparados (a) entre los (n) criterios, sub criterios y/o descriptores según el caso de interés. En el caso de ponderación de criterios esta matriz permite determinar la importancia de un criterio respecto a otro, que a su vez se usa posteriormente para la ponderación de criterios.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Se suma verticalmente los elementos de cada columna. Así se obtiene las sumas vn:

$$v_1, v_2, \dots, v_n = \sum_{i=1}^n a_i$$

Se calcula la matriz de comparaciones normalizada, la cual resulta al dividir cada elemento de matriz de comparaciones pareadas entre la suma vn:

$$A_{NORMALIZADA} = \begin{bmatrix} 1/v_1 & a_{12}/v_2 & a_{13}/v_3 & \dots & a_{1n}/v_n \\ a_{21}/v_1 & 1/v_2 & a_{23}/v_3 & \dots & a_{2n}/v_n \\ a_{31}/v_1 & a_{32}/v_2 & 1/v_3 & \dots & a_{3n}/v_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}/v_1 & a_{n2}/v_2 & a_{n3}/v_3 & \dots & 1/v_n \end{bmatrix}$$

Se calcula el vector prioridad de criterios el cual nos muestra los pesos ponderados de cada criterio ( $P_{1n}$ ) a partir de la matriz normalizada, para ello se suman a modo de vector columna:

$$PESOS\ PONDERADOS = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{1j} \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{2j} \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{3j} \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{12} \\ P_{13} \\ \vdots \\ P_{1n} \end{bmatrix}$$

Se verifica que la suma de elementos del vector prioridad de criterios sea igual a uno.

$$\sum_{i=1}^n P_{1i} = P_{11} + P_{12} + P_{13} + \dots + P_{1n} = 1$$

### 2.3.5.3 Relación de consistencia (RC)

Será calculada por la división del índice de consistencia (IC) y el índice aleatorio de una matriz de comparaciones pareadas (IA), está denotada por:

$$RC = IC/IA$$

### 2.3.5.4 El índice de consistencia (IC)

Nos permite hallar la relación de consistencia de la matriz para verificar si las decisiones fueron adecuadas.

$$IC = (\lambda_{max} - n)/(n - 1)$$

Se multiplica cada valor de la primera columna de la matriz de comparación pareada por la prioridad relativa del primer elemento que se considera y así sucesivamente. Se deben sumar los valores sobre las filas para obtener un vector de valores, denominado vector suma ponderada (VSP).

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{12} \\ P_{13} \\ \vdots \\ P_{1n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} VSP_{11} \\ VSP_{12} \\ VSP_{13} \\ \vdots \\ VSP_{1n} \end{bmatrix}$$

Luego se divide los elementos del vector de suma ponderada entre el correspondiente valor de prioridad para cada uno de los criterios:

$$\begin{aligned} VSP_{11}/P_{11} &= \lambda_1 \\ VSP_{12}/P_{12} &= \lambda_2 \\ VSP_{13}/P_{13} &= \lambda_3 \\ &\vdots \\ VSP_{1n}/P_{1n} &= \lambda_n \end{aligned}$$

Posteriormente se determina la lambda máxima  $\lambda_{max}$

$$\lambda_{max} = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n)/n$$

### 2.3.5.5 Índice aleatorio de una matriz de comparaciones pareadas (IA),

Se obtiene del Tabla 6 de valores del índice aleatorio para (n) criterios diferentes, calculados mediante la simulación de 100,000 matrices (Aguarón et al. 2001).

**Tabla 6: Índice aleatorio de una matriz de comparaciones pareadas**

Cantidad de criterios (n)	Índice aleatorio (IA)
3	0,525
4	0,882
5	1,115
6	1,252
7	1,341
8	1,404
9	1,452
10	1,484
11	1,513
12	1,535
13	1,555
14	1,570
15	1,583
16	1,595

Fuente: Aguarón et al. (2001)

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

A partir de la referencia bibliográfica presentada en cierre de minas y análisis de riesgo, se ha considerado la aplicación de la metodología de análisis de modos de fallo, efecto y criticidad (FMECA) para el análisis de riesgo de componentes de cierre de minas y la metodología de procesos de análisis jerárquico (AHP) para definir las variables base para la determinación de nivel de probabilidad con el fin de disminuir la subjetividad.

La metodología es aplicable a todos componentes de cierre de minas, sin embargo se ha considerado como alcance del presente trabajo al análisis de componentes en escenario de cierre final. Asimismo la metodología es aplicable a cualquier emplazamiento minero, sin embargo se ha considerado como alcance la unidad minera Holy de la empresa minera Ofir, nombres cambiados y fotos no consideradas con fines de confidencialidad del titular minero.

#### **3.1 MATERIALES, EQUIPOS Y REQUISITOS**

##### **3.1.1 MATERIALES**

- Papel bond A4, lápiz, lapiceros, marcadores,
- tintas de impresión,
- discos compactos y
- cuaderno de notas de campo.

##### **3.1.2 EQUIPOS**

- Computador personal, memoria USB,
- cámara fotográfica, GPS, distanciómetro marca LEICA, modelo D330 con 100m de alcance y  $\pm 1$ mm de precisión,

### **3.1.3 REQUISITOS DE INGRESO**

- Respirador media cara de goma marca 3M modelo 7502, filtros contra vapores orgánicos y ácido marca 3M modelo 6003, casco minero marca 3M porta linterna, barbiquejo, guantes de hilo con palma de jebe y lentes de protección claros, mameluco de tela drill cuerpo entero con cintas reflectivas 3M, botas de jebe con puntera de acero, cinturón de cuero, batería de minero y kit de auto-rescate para interior mina;
- evaluación aptitud médica ocupacional y evaluación para ascensos a grandes altitudes (mayor a 2500msnm):
- póliza de seguro de SCTR para minería subterránea;
- transporte vehicular en camioneta equipada para interior mina y servicio de conductor certificado por parte de proveedor homologado para la unidad minera por 21 días;
- alimentación, alojamiento en proveedor homologado para la unidad minera por 21 días;
- aprobación de la inducción de seguridad y salud en el trabajo;
- acompañamiento por parte de operario de mantenimiento experto en la unidad minera.

## **3.2 METODOLOGÍA**

### **3.2.1 LUGAR DE APLICACIÓN**

El estudio se desarrolló en tres fases, previa al campo, fase de campo y una fase de gabinete. La fase de campo se realizó en los componentes mineros en escenario de cierre final de la unidad minera HOLY de la empresa minera OFIR (nombres cambiados para guardar la confidencialidad de la empresa) ubicado en provincia Melgar, región Puno; la fase de gabinete se realizó en los ambientes del Centro de Aprendizaje Abierto de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

### **3.2.2 FASE DE CAMPO: COLECCIÓN DE INFORMACIÓN**

Antes de la fase de campo se entregó a la administración de empresa minera OFIR los requerimientos de ingreso a las instalaciones de la unidad minera HOLY (inducción,

presentación de certificados de aptitud médica y seguro SCTR para minería subterránea, datos de visitantes y EPP). Durante la fase de campo se coordinó con el área de mantenimiento o el área de cierre de minas para la visita a todos los componentes en cierre final de la unidad minera, se diseñó y desarrolló las fichas de campo de Figuras 9 y 10, y también se obtuvo:

- desarrollo de inventario y descripción de los componentes en cierre final;
- colección de información emitida por el área de cierre de minas y el área de mantenimiento.

Se solicitó al área de mantenimiento y cierre de minas de la empresa minera OFIR la siguiente información relativa a los componente en cierre final: procedimientos de operación y experiencia operativa real; análisis de fiabilidad y dossier de seguridad o evaluaciones de seguridad; manuales de fabricante y documentación de diseño; procedimientos vigentes de mantenimiento, experiencia real de los técnicos tareas, vigentes de mantenimiento preventivo, modificaciones planificadas del sistema y tasas de utilización de repuestos; informes de mantenimiento, informes de fallos, informes de inspecciones estructurales, informes de incidentes y accidentes.

Descripción del componente		Escenario	
Nombre:		<input type="checkbox"/> Temporal	<input type="checkbox"/> Progresivo
		<input type="checkbox"/> Final	<input type="checkbox"/> Post cierre
Ubicación		Esquema / diagrama del componente	
Este:		<div style="border: 1px dashed black; height: 100px;"></div>	
Norte:			
Cota:			
Tipo de componente			
<input type="checkbox"/> Labores subterráneas			
<input type="checkbox"/> Tajos abiertos			
<input type="checkbox"/> Depósitos de relaves (diques, embalse, espesados, en pasta, filtrados y toda tipo de relaves)			
<input type="checkbox"/> Botaderos de lixiviación (ripios)			
<input type="checkbox"/> Botaderos de desmonte (estéril, lastre y material de baja ley)			
<input type="checkbox"/> Depósitos de escorias de fundición			
Descripción de funciones principales		Modos de fallo funcional	
		<b>Tajo abierto</b>	<b>Mina subterránea</b>
		<input type="checkbox"/> Falla talud por sismo (FT <sub>4</sub> )	<input type="checkbox"/> Colapso de pilares y puentes de roca (FT <sub>1</sub> )
		<input type="checkbox"/> Infiltración de DAR (FT <sub>5</sub> )	<input type="checkbox"/> Sobrecarga estructural por sismo (FT <sub>2</sub> )
		<b>Depósito de relaves</b>	<input type="checkbox"/> Acidificación de agua (FT <sub>3</sub> )
		<input type="checkbox"/> Liberación de relaves por sismo en dique de arena (FT <sub>6</sub> )	
		<input type="checkbox"/> Liberación de relaves por sismo en dique de material de préstamo (FT <sub>6,1</sub> )	
		<input type="checkbox"/> Liberación de relaves por erosión interna en piping (FT <sub>7</sub> )	
		<input type="checkbox"/> Overtopping por lluvia intensa y/o crecida en dique con geomembrana (FT <sub>8,0</sub> )	
		<input type="checkbox"/> Overtopping por lluvia intensa y/o crecida en dique sin geomembrana (FT <sub>8,1</sub> )	
		<input type="checkbox"/> Overtopping por remoción de masa en dique con geomembrana (FT <sub>9,0</sub> )	
		<input type="checkbox"/> Overtopping por remoción de masa en dique sin geomembrana (FT <sub>9,1</sub> )	
		<input type="checkbox"/> Cont. de agua sub. por infiltración de DAR en dique de arena (FT <sub>10,0</sub> )	
		<input type="checkbox"/> Cont. de agua sub. por infiltración de DAR en dique de material de préstamo (FT <sub>10,1</sub> )	
		<input type="checkbox"/> Cont. de agua sub. por infiltración de DAR desde relaves en pasta (FT <sub>10,2</sub> )	
		<input type="checkbox"/> Cont. Atm. por erosión eólica en el depósito de relaves (FT <sub>11</sub> )	<i>(continúa atrás)</i>
Descripción de causas principales			

**Figura 9: Ficha de análisis de modos de fallo de componentes mineros – formato página 1**



### **3.2.3 FASE DE GABINETE 1: IDENTIFICACIÓN DE FUNCIONES, MODOS DE FALLO Y EFECTOS**

#### **3.2.3.1 Descomposición funcional de los componentes en cierre final**

La clasificación base a su funcionalidad se agrupó a los componentes en cierre final dentro de los siguientes 6 grupos:

- Labores subterráneas
- Tajos abiertos
- Depósitos de relaves (diques, embalse, espesados, en pasta, filtrados y toda tipo de relaves)
- Botaderos de lixiviación (ripios)
- Botaderos de desmonte (estéril, lastre y material de baja ley)
- Depósitos de escorias de fundición

#### **3.2.3.2 Descripción de funciones**

Se identificó y registró todas las funciones primarias del elemento y su estándar de funcionamiento de forma cuantitativa preferentemente (ejemplo: Proporcionar un caudal de  $(400\pm 30)$  l/min de agua), así como las funciones secundarias (ejemplo: contención de agua, contención de aceite, transferencia de carga estructural, protección, suministro de indicaciones para los operadores a través de un sistema de control, etc.).

#### **3.2.3.3 Identificación y descripción de modos de fallo funcional**

- Se identificó las condiciones físicas particulares, razonablemente probables, que causan cada fallo funcional y;
- se incluyó la identificación del elemento físico que ha fallado y una descripción del mecanismo de fallo (ejemplo: Fisura en una brida debido a fatiga o fuga en el actuador debido al desgaste de una junta de estanqueidad);
- Se describió lo más grave que sucederá si el modo de fallo ocurre sobre el componente minero en cierre final;
- se incluyó información suficiente para permitir una evaluación exacta de las consecuencias que se pueden derivar y;

- se tuvo en cuenta los efectos sobre los equipos, personal, público en general y entorno medioambiental según corresponda;

### 3.2.4 FASE DE GABINETE 2: CATEGORIZACIÓN DE SEVERIDAD

#### 3.2.4.1 Efectividad de la medida de cierre con enfoque en comunidad (EMC<sub>C</sub>) y medio ambiente (EMC<sub>M</sub>)

Se calculó a partir del promedio de los valores asignados a la efectividad VE<sub>i</sub> (en Tabla 7) de cada n-ésimo control de las medidas de cierre.

$$EMC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n VE_i$$

**Tabla 7: Categorías de efectividad de las medidas de cierre**

Efectividad de la medida de cierre	Valor asignado a la efectividad (VE <sub>i</sub> )
0%	1,00
< 0% ; 20% >	0,95
[ 20% ; 60% >	0,80
[ 60% ; 80% >	0,65
[ 80% ; 100% ]	0,50

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis (2014)

#### 3.2.4.2 Característica de la interacción con la comunidad (CI<sub>C</sub>)

Se calculó a partir de la sumatoria de valores asignados a cada característica de interacción presentado en el Tabla 8.

$$CI_C = INC + PR + FR + DS + REC + CR$$

#### 3.2.4.3 Característica de la interacción con el medio ambiente (CI<sub>M</sub>)

Implica la suma máxima de valores de características de interacción, los valores asignados a cada categoría de interacción se presentan en el Tabla 9 con la respectiva definición de los mismos, a continuación la notación respectiva.

$$CI_{M, MAX} = EX + DU + REV + INA + RA$$

Donde el subíndice  $_{MAX}$  refiere al máximo valor de sumatoria de características de interacción del efecto del componente sobre uno de los componentes del medio ambiente, lo cuales son:

- Aire, enfoca efectos eventuales de emisiones de material particulado,
- suelo, enfoca la capacidad de uso y el valor ambiental del suelo,
- agua superficial, enfoca calidad, cantidad y uso,
- agua subterránea, enfoca calidad, cantidad y uso,
- flora y fauna, enfoca especies en conservación y formaciones vegetacionales existentes,
- áreas naturales protegidas, enfoca en efecto alguno sobre estas superficies.

Todas las características de interacción se definen en el glosario de términos del Anexo 2.

**Tabla 8: Categorías de características de interacción con la comunidad**

Característica	1	2	3	4	5
<b>Intensidad (INC)</b> Grado de afectación en áreas de uso antrópico.	No tiene potencial de afectar zonas residenciales, ceremoniales, recreativas o productivas.	Tiene potencial de afectar una de las siguientes zonas; residenciales, ceremoniales, recreativas o productivas.	Tiene potencial de afectar dos de las siguientes zonas; residenciales, ceremoniales, recreativas o productivas.	Tiene potencial de afectar tres de las siguientes zonas; residenciales, ceremoniales, recreativas o productivas.	Tiene potencial de afectar todas las siguientes zonas; residenciales, ceremoniales, recreativas o productivas.
<b>Proximidad (PR)</b> De instalación minera a asentamientos humanos o áreas con actividad antrópica.	Instalación minera emplazada fuera de asentamientos o lugares con actividades antrópicas.	-	Instalación minera emplazada colindante con asentamiento y/o lugares con actividades antrópicas.	-	Instalación minera emplazada en medio de asentamiento.
<b>Fragilidad (FR)</b> De personas ante la ocurrencia del evento en relación a su composición etaria	[ 0% ; 5% > de población infantil y anciana.	[ 5% ; 10% > de población infantil y anciana.	[ 10% ; 20% > de población infantil y anciana.	[ 20% ; 30% > de población infantil y anciana.	[ 30% ; 100% ] de población infantil y anciana.
<b>Daño a la Salud (DS)</b> Potencial afectación a la salud de las personas.	No existe un potencial de afectación a la salud.	Existe potencial de afectación, pero con molestias en la salud que pueden desaparecer por sí solas y en pocos minutos (por ejemplo nauseas provocadas por malos olores que duren poco tiempo).	Existe un potencial de afectación a la salud, que no dejando secuelas, sí implica la necesidad de asistencia médica para recuperarla en pocas horas.	Existe un potencial de afectación a la salud que dejará secuelas por más de un día (sin secuelas crónicas), y que requiere de tratamiento u observación médica.	Existe un potencial de afectación a la salud que causará secuelas crónicas o la muerte.

“... continuación”

Característica	1	2	3	4	5
<b>Recuperabilidad (REC)</b> Posibilidad de volver a las actividades normales después del evento.	Inmediato (durante la semana en que ocurre el hecho).	Corto plazo (durante 2da a 4ta semanas de ocurrido el hecho).	Mediano plazo (durante el mes 2do y hasta 12vo de ocurrido el hecho).	Largo plazo (durante el mes 13vo y 24vo de ocurrido el hecho).	Irrecuperable (no existe recuperación).
<b>Capacidad de Respuesta (CR)</b> Ante la ocurrencia del evento.	Existencia de sistema de alerta y totalmente capacitados.	Existencia de sistema de alerta temprana sin capacitación de la población.	Existencia de sistema de alerta temprana y parcial capacitación de la población.	No existencia de sistema de alerta e información general de la población.	No existencia de sistema alerta temprana ni información a la población.

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis (2014)

**Tabla 9: Valor asignado a la interacción con el medio ambiente**

Característica	1	2	3	4	5
<p><b>Extensión (EX)</b> Magnitud y/o consecuencia espacial del evento.</p>	Puntual: cuando la consecuencia se manifiesta en el entorno inmediato a la fuente generadora.	Parcial: cuando la consecuencia tiene implicancias que abarcan una superficie menor a una subcuenca.	Local: cuando la consecuencia se manifiesta abarcando una superficie igual a una subcuenca.	Extenso: cuando la consecuencia se manifiesta abarcando la superficie equivalente o mayor a una subcuenca.	Regional: cuando la consecuencia tiene implicancias regionales.
<p><b>Duración (DU)</b> Tiempo que permanecerá la consecuencia desde su aparición.</p>	Temporal: hasta 6 meses después de verificado el hecho.	Corto plazo: entre 6 meses y 1 año.	Mediano plazo: entre 1 y 3 años.	Largo plazo: entre 3 y 5 años.	Permanente: duración superior a 5 años.
<p><b>Reversibilidad (REV)</b> Capacidad que tiene el medio ambiente de revertir naturalmente o mediante acciones las consecuencias del riesgo.</p>	Reversible: la consecuencia se revierte en forma natural una vez finalizada la acción que lo genera.	Reversibilidad baja: la consecuencia no se revierte de manera natural después de finalizada la acción que lo genera, pero puede ser revertido en algunos aspectos y de manera transitoria, mediante acciones correctoras.	Parcialmente reversible: la consecuencia no se revierte de manera natural después de finalizada la acción que lo genera, pero puede ser revertido al menos parcialmente, mediante acciones correctoras.	Potencialmente reversible: la consecuencia no se revierte de manera natural después de finalizada la acción que lo genera, pero puede ser revertido en algunos aspectos específicos, mediante acciones correctoras.	Irreversible: la consecuencia no se revierte en forma natural al finalizar la acción que lo genera y tampoco puede ser revertido mediante acciones correctoras.

“... continuación”

Característica	1	2	3	4	5
<b>Intensidad (INA)</b> Grado de alteración sobre el medio ambiente que pueda generar el riesgo analizado	Muy bajo: grado de alteración mínima en que el componente ambiental se mantiene en su línea base.	Bajo: grado de alteración en que el componente ambiental se modifica de baja forma en su línea base.	Medio: grado de alteración moderado que implica cambios parciales en la línea base del componente.	Alto: grado de alteración mayor que implica una eventual eliminación del componente ambiental o un cambio relevante de su línea base.	Muy Alto: grado de alteración mayor que implica la eliminación del componente ambiental o el cambio total de su línea base.
<b>Relevancia Ambiental (RA)</b> Valor ambiental del componente.	El componente ambiental está abundantemente representado y/o no posee restricciones que condicionen su intervención.	-	El componente ambiental posee una representatividad aceptable y/o no posee restricciones que condicionan su intervención.	-	El componente ambiental tiene escasa representatividad y tiene restricciones que condicionan su intervención.

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis (2014)

### 3.2.4.4 Severidad de la consecuencia (SE)

Se calculó con la combinación de la efectividad de la medida de cierre (EMC) y las características de interacción (CI).

$$SE_C = EMC_C \times CI_C$$

$$SE_M = EMC_M \times CI_M$$

El subíndice  $C$  indica que la variable involucra enfoque a la comunidad y el sufijo  $M$  indica que la variable involucra enfoque al medio ambiente.

Se listaron y describieron las consecuencias directas e indirectas en términos de los efectos de los fallos funcionales y se categorizaron las consecuencias en función de la severidad de sus efectos sobre la comunidad y medio ambiente tal como se presenta en el Tabla 10:

**Tabla 10: Categorías de severidad**

Nivel de severidad	Severidad con efectos sobre la comunidad - $SE_C$	Severidad con efectos sobre el medio ambiente - $SE_M$
Severidad 1	[ 03 ; 08 >	[ 02 ; 06 >
Severidad 2	[ 08 ; 13 >	[ 06 ; 10 >
Severidad 3	[ 13 ; 18 >	[ 10 ; 14 >
Severidad 4	[ 18 ; 23 >	[ 14 ; 18 >
Severidad 5	[ 23 ; 29 ]	[ 18 ; 24 ]

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis (2014)

### 3.2.5 FASE DE GABINETE 3: CATEGORIZACIÓN DE PROBABILIDAD

Se definió los niveles en rangos para la categorizar la probabilidad del modo de fallo en cinco categorías. Se registró paralelamente las fuentes de datos e hipótesis en contexto, en especial cuando se obtienen los datos de componentes en pleno funcionamiento.

#### 3.2.5.1 Probabilidad de ocurrencia del evento natural (PEN)

Se categorizó en correspondencia al máximo nivel en conjunto de los niveles de vulnerabilidad de cada evento natural. Los niveles de vulnerabilidad por cada evento natural se obtuvieron de las últimas actualizaciones brindadas por las entidades nacionales competentes:

- Mapa de escenarios de riesgo para la temporada de lluvias
- Mapa de calificación de las provincias según sus niveles de peligros sísmicos
- Mapa de susceptibilidad física de zonas propensas a inundaciones y deslizamientos frente a la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos

Según CENEPRED (2015) los eventos naturales que afectan al Perú son el exceso de lluvias, déficit de lluvias, heladas, friaje, sismos, tsunamis, explosión volcánica, el niño y la niña (ver en Tabla 11), de los cuales solo se consideró exceso de lluvias, sismos; se añadió con fines del presente estudio movimiento de masa e inundaciones.

**Tabla 11: Regiones expuestas a fenómenos naturales**

	Amazonas	Ancash	Apurímac	Arequipa	Ayacucho	Cajamarca	Callao	Cusco	Huancavelica	Huánuco	Ica	Junín	La Libertad	Lambayeque	Lima	Loreto	Madre de Dios	Moquegua	Pasco	Piura	Puno	San Martín	Tacna	Tumbes	Ucayali
Exceso de lluvias	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Sismos	x	x	x	x		x	x	x			x			x	x			x		x		x	x	x	

Fuente: CENEPRED (2015)

### 3.2.5.2 Factor técnico operacional del componente (FT)

El factor técnico, es un valor numérico entre 0 y 100 que es atribuido a un modo de fallo específico del componente. El factor técnico es el resultado del cálculo de criterios técnicos ponderados a partir del proceso de análisis jerárquico (AHP), el cual es un análisis de decisión multicriterio (MCDA) descrito en la sección 3.3.5.

Se utilizó los factores técnicos elaborados por los especialistas de Arcadis para el Servicio Nacional de Geología y Minería (2014), resumidos en el siguiente Tabla 12 y detallados en Anexo 4.

Se considera como modos de fallo de tipo operativo porque sus criterios técnicos están basados en variables o criterios técnicos que varían durante la operación minera o tiempo de evaluación; y se considera modo de fallo de tipo de diseño porque están basados en criterios técnicos modelados o predeterminados durante el planeamiento.

**Tabla 12: Factores técnicos operativos de modos de fallos de componentes mineros**

N°	Tipo	Modo de fallo	Fórmula de FT
<b>Mina subterránea</b>			
1	Operativo	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	$FT_1 = (3,91a_1 \times 3,91b_1 \times 3,91c_1) + 40d_1$
2	Operativo	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	$FT_2 = 64a_2 + 26b_2 + 10c_2$
3	Operativo	Acidificación de agua en mina subterránea	$FT_3 = 50a_3 + 50b_3$
<b>Tajo abierto</b>			
4	Operativo	Falla de talud por sismo en tajo abierto	$FT_4 = 52a_4 + 20b_4 + 20c_4 + 8d_4$
5	Operativo	Infiltración de drenaje ácido de roca (DAR) de mina	$FT_5 = 45a_5 + 23b_5 + 8c_5 + 8d_5 \times (e_5 + f_5 + g_5)$
<b>Depósito de relaves</b>			
6	Operativo	Liberación de relaves por sismo en depósitos con dique de arena	$FT_{6,0} = 29a_6 + 29b_6 + 16c_6 + 10d_6 + 5e_6 + 5f_6 + 2g_6 + 2h_6 + 2i_6$
6.1	Operativo	Liberación de relaves por sismo en depósitos con dique de material de préstamo	$FT_{6,1} = 30a_6 + 30b_6 + 17c_6 + 9d_6 + 5e_6 + 5f_6 + 2h_6 + 2i_6$
7	Operativo	Liberación de relaves por erosión interna por piping del depósito	$FT_7 = 46a_7 + 25b_7 + 14c_7 + 7d_7 + 4e_7 + 4f_7$
8	Operativo	Overtopping por lluvia intensa y/o crecida en depósito de relaves con dique con geomembrana	$FT_{8,0} = 56a_8 + 26c_8 + 12d_8 + 6e_8$
8.1	Operativo	Overtopping por lluvia intensa y/o crecida en depósito de relaves con dique sin geomembrana	$FT_{8,1} = 56a_8 + 26b_8 + 12c_8 + 6e_8$
9	Operativo	Overtopping por remoción de masa en depósito de relaves con dique con geomembrana	$FT_{9,0} = 50a_9 + 26b_9 + 13d_9 + 7e_9 + 4f_9$
9.1	Operativo	Overtopping por remoción de masa en depósito de relaves con dique sin geomembrana	$FT_{9,1} = 50a_9 + 26b_9 + 13c_9 + 7d_9 + 4e_9$

“... continuación”

Nº	Tipo	Modo de fallo	Fórmula de FT
<b>Depósitos de rípios de lixiviación</b>			
10	Operativo y diseño	Contaminación de aguas subterráneas por infiltración de DAR desde depósito de relaves con dique de arena	$FT_{10.0} = (6b_{10} + 4e_{10}) \times (6,3a_{10} + 1,1d_{10} + 2,6c_{10})$
10.1	Operativo y diseño	Contaminación de aguas subterráneas por infiltración de DAR desde depósito de relaves con dique de material de préstamo	$FT_{10.1} = (6b_{10} + 4e_{10}) \times (7a_{10} + 3d_{10})$
10.2	Operativo y diseño	Contaminación de aguas subterráneas por infiltración de DAR desde depósito de relaves en pasta	$FT_{10.2} = 8b_{10} \times (8,75a_{10} + 3,75d_{10})$
11	Operativo	Contaminación atmosférica por erosión eólica en el depósito de relaves	$FT_{11} = 50a_{11} + 50b_{11}$
12	Operativo	Falla de talud por sismo en depósito de rípios de lixiviación (FT <sub>12</sub> )	$FT_{12} = 21,5a_{12} + 21,5b_{12} + 10c_{12} + 10d_{12} + 10e_{12} + 9f_{12} + 9g_{12} + 9h_{12}$
13	Operativo	Falla de talud por erosión hídrica en depósito de rípios de lixiviación (FT <sub>13</sub> )	$FT_{13} = 60a_{13} + 40b_{13}$
14	Operativo	Contaminación de agua subterránea por infiltración de DAR en pilas estáticas de rípios de lixiviación (FT <sub>14</sub> )	$FT_{14} = 26a_{14} + 26b_{14} + 26c_{14} + 12d_{14} + 5e_{14} + 5f_{14}$
15	Operativo	Contaminación de agua subterránea por infiltración de DAR en botaderos de rípios de lixiviación (FT <sub>15</sub> )	$FT_{15} = 38a_{15} + 38b_{15} + 12c_{15} + 12d_{15}$
16	Operativo	Contaminación de agua superficial por inundación/crecida en depósitos de rípios de lixiviación (FT <sub>16</sub> )	$FT_{16} = 100a_{16}$
17	Operativo	Contaminación atmosférica por erosión eólica en depósitos de rípios de lixiviación (FT <sub>17</sub> )	$FT_{17} = 100a_{17}$
<b>Depósitos de estériles</b>			
18	Operativo y diseño	Contaminación de agua subterránea por lluvias en depósitos de estériles (FT <sub>18</sub> )	$FT_{18} = (7,5a_{18} \times 4,8c_{18}) + 36b_{18} + 7(d_{18} + e_{18} + f_{18} + g_{18})$
19	Operativo	Contaminación de agua subterránea por una crecida en depósitos de estériles (FT <sub>19</sub> )	$FT_{19} = 40a_{19} + 40b_{19} + 11c_{19} + 9d_{19}$
20	Operativo	Contaminación atmosférica por erosión eólica en depósitos de estériles (FT <sub>20</sub> )	$FT_{20} = 100a_{20}$

“... continuación”

Nº	Tipo	Modo de fallo	Fórmula de FT
21	Operativo	Contaminación de agua superficial por lluvia intensa en depósitos de estériles (FT <sub>21</sub> )	$FT_{21} = 37.5a_{21} + 12,5(c_{21} + d_{21}) + (8,33b_{21} \times 4,5e_{21})$
22	Operativo	Contaminación de agua superficial por crecida en depósitos de estériles (FT <sub>22</sub> )	$FT_{22} = 43a_{22} + (8b_{22} \times 5,4d_{22}) + 14c_{22}$
23	Operativo	Erosión hídrica por lluvia o deshielo diferido intenso en depósitos de estériles (FT <sub>23</sub> )	$FT_{23} = 26a_{23} + 26b_{23} + 26c_{23} + 12d_{23} + 5e_{23} + 5f_{23}$
24	Operativo	Deslizamiento por sismo en depósitos de estériles (FT <sub>24</sub> )	$FT_{24} = 14a_{24} + 14b_{24} + 14c_{24} + 14d_{24} + 14e_{24} + 14f_{24} + 5g_{24} + 5h_{24} + 5i_{24} + j_{24}$
<b>Depósitos de escórias</b>			
25	Operativo	Lixiviación natural por lluvias en depósitos de escorias (FT <sub>25</sub> )	$FT_{25} = 50a_{25} + 50b_{25}$

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

### 3.2.5.3 Condición de la instalación (CIN)

Se calculó a partir de la combinación de la eficiencia de las medidas de cierre que afectan a la probabilidad de ocurrencia del evento ( $EMC_p$ ) y factor técnico operacional del componente (FT). El  $EMC_p$  se calculó tal como se menciona líneas arriba en sección 4.2.4.2 y Tabla 8 el cual es un valor asignado al porcentaje de eficiencia de la medida de cierre que afecte a la probabilidad de ocurrencia de un evento. La CIN se categorizó usando el los valores presentados en el Tabla 13.

$$CIN = EMC_p \times FT$$

**Tabla 13: Categorías de condición de la instalación**

$EMC_p \times FT$	Categorías de CIN
[ 0 ; 20 >	CIN 1
[ 20 ; 40 >	CIN 2
[ 40 ; 60 >	CIN 3
[ 60 ; 80 >	CIN 4
[ 80 ; 100 ]	CIN 5

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.5.4 Probabilidad del modo de fallo

Se asignó a partir de una matriz que combina la probabilidad de ocurrencia de un evento natural (PEN) y la condición de la instalación (CIN), dando como resultado 5 niveles de probabilidad presentado en el siguiente Tabla 14.

**Tabla 14: Asignación del nivel de probabilidad del modo de fallo**

	CIN 1	CIN 2	CIN 3	CIN 4	CIN 5
PEN 1	Probabilidad 1	Probabilidad 2	Probabilidad 2	Probabilidad 3	Probabilidad 3
PEN 2	Probabilidad 2	Probabilidad 3	Probabilidad 3	Probabilidad 4	Probabilidad 4
PEN 3	Probabilidad 2	Probabilidad 3	Probabilidad 4	Probabilidad 5	Probabilidad 5
PEN 4	Probabilidad 3	Probabilidad 4	Probabilidad 5	Probabilidad 5	Probabilidad 5
PEN 5	Probabilidad 3	Probabilidad 4	Probabilidad 5	Probabilidad 5	Probabilidad 5

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.6 ANALIZAR LA CRITICIDAD DE LOS MODOS DE FALLO FUNCIONALES

Se estimó el nivel de criticidad en función a la combinación de las categorías de consecuencia y probabilidad dando como resultado la categorización de 4 rangos de criticidad, tal como se presenta en el Tabla 15.

**Tabla 15: Asignación del nivel de criticidad del modo de fallo funcional**

	Severidad 1	Severidad 2	Severidad 3	Severidad 4	Severidad 5
Probabilidad 1	Criticidad 1	Criticidad 1	Criticidad 1	Criticidad 2	Criticidad 2
Probabilidad 2	Criticidad 1	Criticidad 2	Criticidad 2	Criticidad 3	Criticidad 3
Probabilidad 3	Criticidad 1	Criticidad 2	Criticidad 3	Criticidad 4	Criticidad 4
Probabilidad 4	Criticidad 2	Criticidad 3	Criticidad 4	Criticidad 4	Criticidad 4
Probabilidad 5	Criticidad 2	Criticidad 3	Criticidad 4	Criticidad 4	Criticidad 4

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se categorizó según su criticidad todos los componentes en cierre final en la unidad minera HOLY de la empresa OFIR. Se concluyó y recomendó acerca de los resultados obtenidos.

### 3.2.7 CRONOGRAMA

El tiempo planificado está compuesto por tres fases:

- fase previa al campo de cinco meses;
- fase de campo de un mes y;
- fase de gabinete de cuatro meses;

Se ha considerado el cumplimiento óptimo de cada tarea durante la planificación, presentado en la siguiente Tabla 16.

**Tabla 16: Planificación tareas del proyecto**

Tarea	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
<b>1 Fase de previa al campo</b>	■											
1.3 Revisión de requisitos, aprobación, coordinación de visita para investigación	■			■								
1.4 Revisión de plan de cierre y otros documentos relacionados.			■		■							
1.5 Solicitud y aprobación de financiamiento privado de toda la investigación.				■								
1.6 Contratación de SCTR para minera subterránea en aseguradora privada.								■				
1.7 Contratación evaluación médica								■				
1.8 Compras de materiales, alquiler de equipos, alojamiento, contratación de transporte								■				
<b>2 Fase de campo</b>									■			
2.1 Viaje, aspectos administrativos, reconocimiento, levantamiento y revisión de datos.									■			
<b>3 Fase de gabinete</b>										■		
3.1 Análisis de riesgo FMECA – MCDA, conclusiones, recomendaciones y edición final										■		

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.8 PRESUPUESTO

Según lo estimado en el Tabla 17, el presupuesto totaliza 8450 soles.

**Tabla 17: Costos por fases del proyecto**

	<b>Tarea</b>	<b>Costo S/.</b>
<b>1</b>	<b>Fase de previa al campo</b>	<b>1850</b>
1.1	Contratación de póliza de seguro (SCTR) para minera subterránea	400
1.2	Evaluación médica.	150
1.3	Compra de materiales: papel, lapicero, cuaderno y EPP varios, etc	500
1.4	Alquiler de equipos: distanciómetro, cámara, GPS	800
<b>2</b>	<b>Fase de campo</b>	<b>6000</b>
2.1	Viaje Lima – Puno, Puno – Lima	200
2.2	Hospedaje local y alimentación por 21 días	1500
2.3	Alquiler de camioneta, chofer por 21 días y combustible	4300
<b>3</b>	<b>Fase de gabinete</b>	<b>300</b>
3.1	Análisis de riesgo impresiones para revisión y edición final	300
	<b>Subtotal</b>	<b>8150</b>
	Imprevistos	300
	<b>Total</b>	<b>8450</b>

Fuente: Promedio de cotizaciones de empresas como MAPFRE, RENTACAR SAN JOSE, HIRAOKA, CRUZ DEL SUR.

A partir del mismo se estimó, comparó con los costos anuales para la restauración de un componente colapsado y el efecto sobre la garantía financiera en el cierre de mina.

De acuerdo con lo dispuesto por la Ley que regula el Cierre de Minas, Ley N° 28090, y su Reglamento, aprobado por Decreto Supremo N° 033-2005-EM y según la Actualización del Plan de Cierre de la UM Holy 2013, empresa minera Ofir constituye una carta fianza como garantía financiera en beneficio de la autoridad competente a través de una entidad financiera autorizada por la Superintendencia de Banca y Seguros. Dicha fianza tiene la característica solidaria, incondicionada, irrevocable, sin beneficio de excusión y de ejecución inmediata.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 DE LA FASE DE CAMPO: COLECCIÓN DE INFORMACIÓN

A continuación en la Tabla 18 se presenta el inventario de 24 componentes en escenario de cierre final.

**Tabla 18: Inventario de componentes en escenario de cierre final**

Nombre	Descripción	UTM Este	UTM Norte	Cota
<b>Bocamina 05</b>	Alto 1,60m; ancho 2,40m; 4850msnm; sin evidencia visual de inestabilidad en pilares corona y superficie; napa de probable 4523msnm; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	356108	8429297	4850
<b>Bocamina 06</b>	Alto 1,60m; ancho 2,80m; 4890msnm; sin evidencia visual de inestabilidad en pilares corona y superficie; napa de probable 4523msnm; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	356188	8429026	4890
<b>Bocamina 11</b>	Alto 1,60m; ancho 2,40m; 5010msnm; sin evidencia visual de inestabilidad en pilares corona y superficie; napa de probable 4523msnm; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	356376	8428399	5010
<b>Bocamina 23</b>	Alto 3,50m; ancho 3,50m; 4820msnm; sin evidencia visual de inestabilidad en pilares corona y superficie; napa de probable 4523msnm; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	357255	8426943	4820
<b>Bocamina 28</b>	Alto 2,50m; ancho 2,60m; 4730msnm; sin evidencia visual de inestabilidad en pilares corona y superficie; napa de probable 4523msnm; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	357604	8427075	4730
<b>Bocamina 32</b>	Alto 2,25m; ancho 7,20m; 4660msnm; sin evidencia visual de inestabilidad en pilares corona y superficie; napa de probable 4523msnm; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	357507	8426942	4660

... continuación”

<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>UTM Este</b>	<b>UTM Norte</b>	<b>Cota</b>
<b>Bocamina 33</b>	Alto 2,00m; ancho 7,70m; 4596msnm; sin evidencia visual de inestabilidad en pilares corona y superficie; napa de probable 4523msnm; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	357894	8426940	4596
<b>Bocamina 34</b>	Alto 4,70m; ancho 8,50m; 4600msnm; sin evidencia visual de inestabilidad en pilares corona y superficie; napa de probable 4523msnm; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	357895	8426940	4600
<b>Bocamina 91</b>	Alto 3,50m; ancho 6,50m; 4530msnm; sin evidencia visual de inestabilidad en pilares corona y superficie; napa de probable 4523msnm; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	357775	8426645	4530
<b>Bocamina 92</b>	Alto 3,50m; ancho 3,50m; 4530msnm; sin evidencia visual de inestabilidad en pilares corona y superficie; napa de probable 4523msnm; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	357705	8426621	4530
<b>Bocamina ingreso rampa Nv. 4523</b>	Alto 4,00m; ancho 5,00m; 4523msnm; sin evidencia visual de inestabilidad en pilares corona y superficie; napa de probable hasta el nivel de la bocamina; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	357584	8426275	4523
<b>Chimenea 11</b>	Perforación de 3,40m × 3,80m; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	355905	8429392	4745
<b>Chimenea 15</b>	Perforación de 3,40m × 3,80m; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	356004	8428697	4875
<b>Chimenea 15A</b>	Perforación de 2,10m × 2,40m; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	355884	8428563	4895
<b>Chimenea 90</b>	Perforación de 3,40m × 3,80m; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	365463	8428396	5075
<b>Chimenea 17</b>	Perforación de 2,00m × 2,60m; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	356390	8428115	5090
<b>Chimenea 21</b>	Perforación de 4,30m × 4,30m; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	356609	8427283	4990

“... continuación”

<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>UTM Este</b>	<b>UTM Norte</b>	<b>Cota</b>
<b>Chimenea 39</b>	Perforación de 1,40m × 2,00m; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	357299	8427531	4920
<b>Chimenea 56</b>	Perforación de 2,90m × 3,80m; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	356571	8427046	4940
<b>Chimenea 63</b>	Perforación de 2,00m × 3,40m; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	357079	8426816	4815
<b>Chimenea 84</b>	Perforación de 2,00m × 2,40m; PNN=2,08; pH agua subterránea=[6,47 ; 11,40]	357643	8426609	4640
<b>Depósito de desmonte cancha N° 35</b>	Desmonte de material granular sin cohesión sobre morrena compacta; con talud máximo de 2H:1V; mínimos factores de seguridad estático 1,3 y pseudoestático 0,9; PNN=[4,06 ; 15,99].	357200	8426100	4530
<b>Depósito de mineral cancha N° 37</b>	Desmonte temporal de material en acopio para su ingreso a concentradora 533; alto 15m; talud 1,5H:1V.	357487	8426254	4540
<b>Depósito de relaves y diques de Bofedal III</b>	Depósito de 1170m × 340m; aceleración basal 0,25g; factor de seguridad estático y pseudoestático de 1,6; 1,1 respectivamente, diques de material de préstamo.	357479	8423915	4460

Fuente: Elaboración propia

## 4.2 DE LA FASE DE GABINETE 1: IDENTIFICACIÓN DE FUNCIONES, MODOS DE FALLO Y EFECTOS

### 4.2.1 DESCOMPOSICIÓN FUNCIONAL DE LOS COMPONENTES EN CIERRE FINAL

Según sus funciones están clasificados en, tal como lo presenta la Tabla 19:

- 21 labores subterráneas (11 bocaminas y 10 chimeneas)
- 2 depósitos de desmonte
- 1 depósito de relaves

**Tabla 19: Lista de componentes en escenario de cierre final**

Tipo	Nombre
Labor subterránea (11 bocaminas y 10 chimeneas)	Bocamina 05, Bocamina 06, Bocamina 11, Bocamina 23, Bocamina 28, Bocamina 32, Bocamina 33, Bocamina 34, Bocamina 91, Bocamina 92, Bocamina ingreso rampa Nv. 4523, Chimenea 11, Chimenea 15, Chimenea 15A, Chimenea 90, Chimenea 17, Chimenea 21, Chimenea 39, Chimenea 63, Chimenea 84
Depósito de desmonte (2)	Depósito de desmonte cancha N° 35, Depósito de mineral cancha N° 37
Depósito de relave (1)	Depósito de relaves y diques de Bofedal III

Fuente: Elaboración propia

### 4.2.2 DESCRIPCIÓN DE FUNCIONES

- Funciones de labor subterránea: Acceso de personas, minerales, equipos, materiales, efluentes, emisiones y residuos; soporte de carga geoestática e hidrostática
- Funciones de depósito de desmonte: Soporte estructural de carga de desmonte; soporte ante eventos naturales extremos.
- Funciones de depósito de relaves: Soporte estructural de carga de relaves; acopio de relaves  $S=0,2\%$ ; soporte ante eventos naturales extremos.

### 4.2.3 DESCRIPCIÓN DE MODOS DE FALLOS FUNCIONALES

Se describen a continuación los modos de fallos funcionales de labor subterránea:

- Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea
- Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea
- Acidificación de agua de mina subterránea

Modos de fallos funcionales de depósito de desmonte:

- Contaminación de agua subterránea por lluvias en depósito de desmonte
- Contaminación atmosférica por erosión eólica en depósito de desmonte
- Contaminación de agua superficial por lluvia intensa en depósito de desmonte
- Erosión hídrica por lluvia intensa en depósito de desmonte
- Deslizamiento del depósito de desmonte por sismo

Modos de fallos funcionales de depósito de relave:

- Liberación de relaves por sismo en depósito de relaves con dique de material de préstamo
- Overtopping por lluvia intensa en depósito de relaves de dique con geomembrana
- Overtopping por remoción de masa en depósito con geomembrana
- Contaminación de agua subterránea por infiltración de DAR desde depósito de relave de dique de material de préstamo
- Contaminación atmosférica por erosión eólica en depósito de relaves

#### **4.2.4 DESCRIPCIÓN DE EFECTOS DE LOS FALLOS FUNCIONALES**

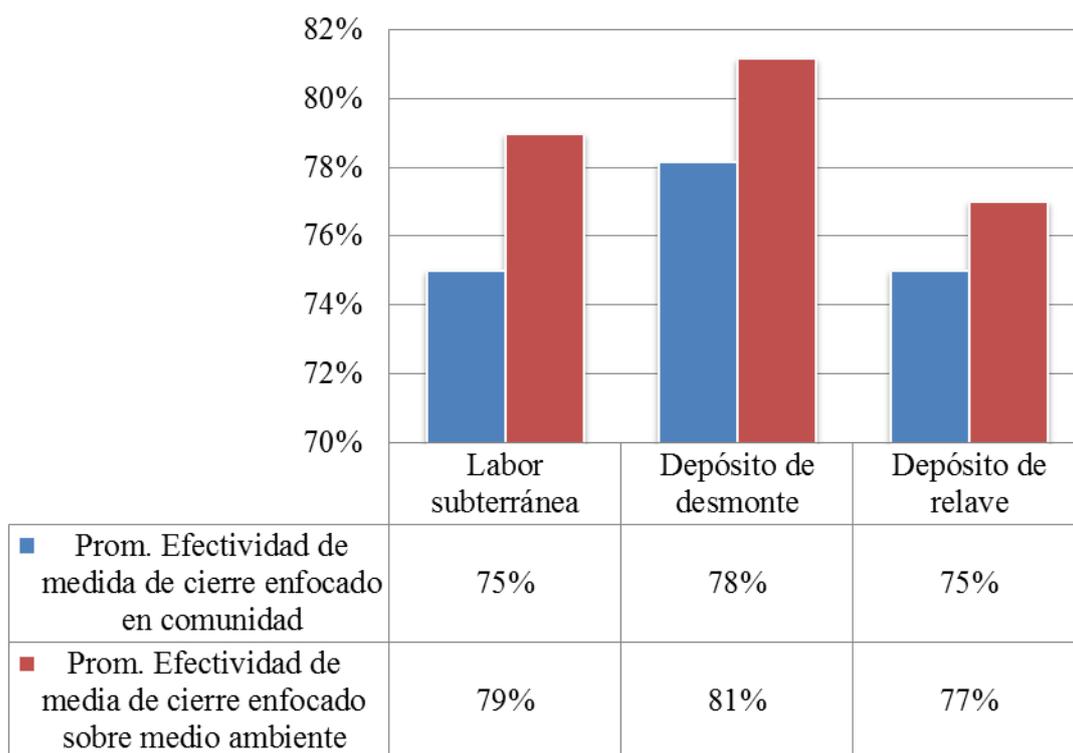
- Accidentes por derrumbes de labor subterránea;
- deslizamiento de desmonte y deslizamiento de relaves;
- intoxicación por consumo de agua superficial y agua subterránea de pozos;
- inhalación de partículas de desmonte y de relave;
- alteración de la calidad de agua superficial y subterránea;
- calidad de suelo; alteración del hábitat y muerte de especies;
- emisión de material particulado y superficies inestables.

### 4.3 DE LA FASE DE GABINETE 2: CATEGORIZACIÓN DE SEVERIDAD

#### 4.3.1 EFECTIVIDAD DE LA MEDIDA DE CIERRE CON ENFOQUE EN COMUNIDAD (EMC<sub>C</sub>) Y MEDIO AMBIENTE (EMC<sub>M</sub>)

A continuación en la Figura 11 se muestra la efectividad de medidas de cierre de cada grupo de componentes en escenario de cierre final, con enfoque en la comunidad y en el medio ambiente.

Donde se ha estimado una mayor efectividad de las medidas de cierre de los depósitos de desmonte con enfoque en la comunidad y medio ambiente, la cual es atribuida por la eliminación completa del depósito de desmonte de mineral cancha N° 37, suprimiendo toda posibilidad de contaminación de algún componente ambiental o efectos adversos por inestabilidad física y geoquímica del depósito, siendo esta la mejor medida de cierre para depósitos.

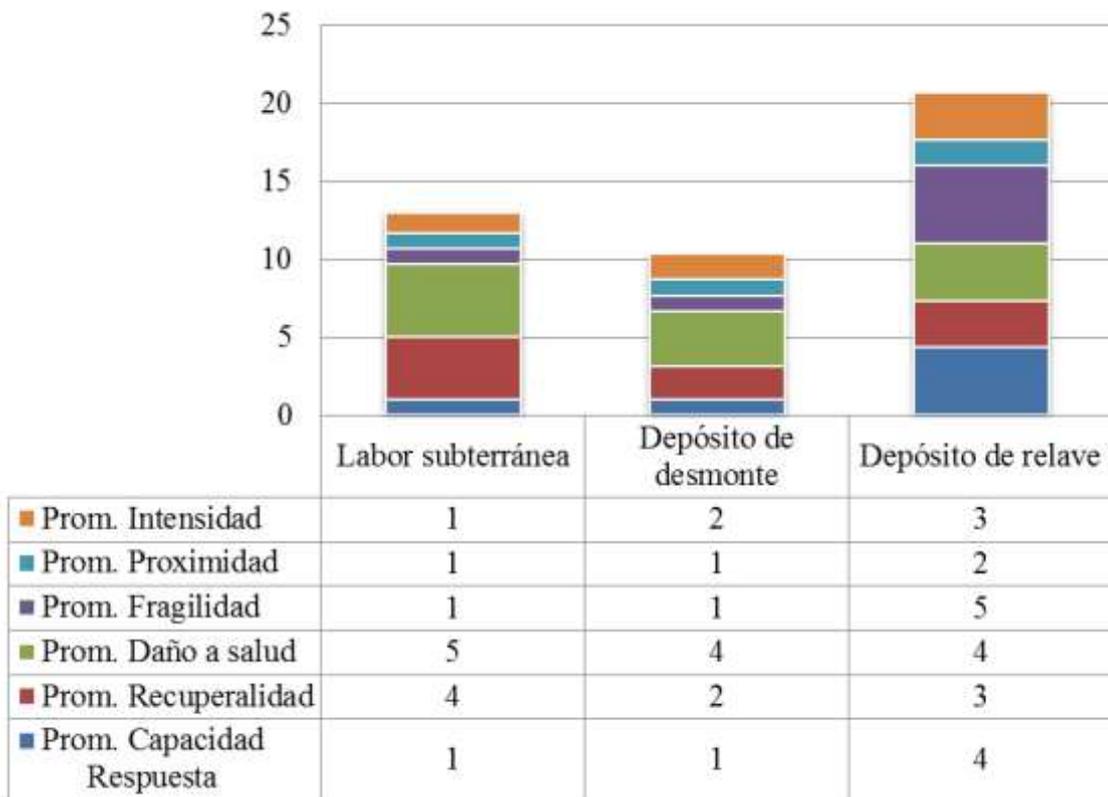


**Figura 11: Efectividad de las medidas de cierre de componentes mineros con enfoque a la comunidad y medio ambiente**

### 4.3.2 CARACTERÍSTICA DE LA INTERACCIÓN CON LA COMUNIDAD (CI<sub>c</sub>)

A continuación en la Figura 12 se muestra los promedios de características de interacción de los efectos sobre la sobre la comunidad. Los valores de interacción con la comunidad están en el rango de 1 a 5, donde los valores más bajos representan efectos insignificantes y bajos, mientras que los valores más altos representan efectos altos y significativos.

Donde se observa que los efectos de fallos en el depósito de relave posee una significativa interacción con la comunidad.

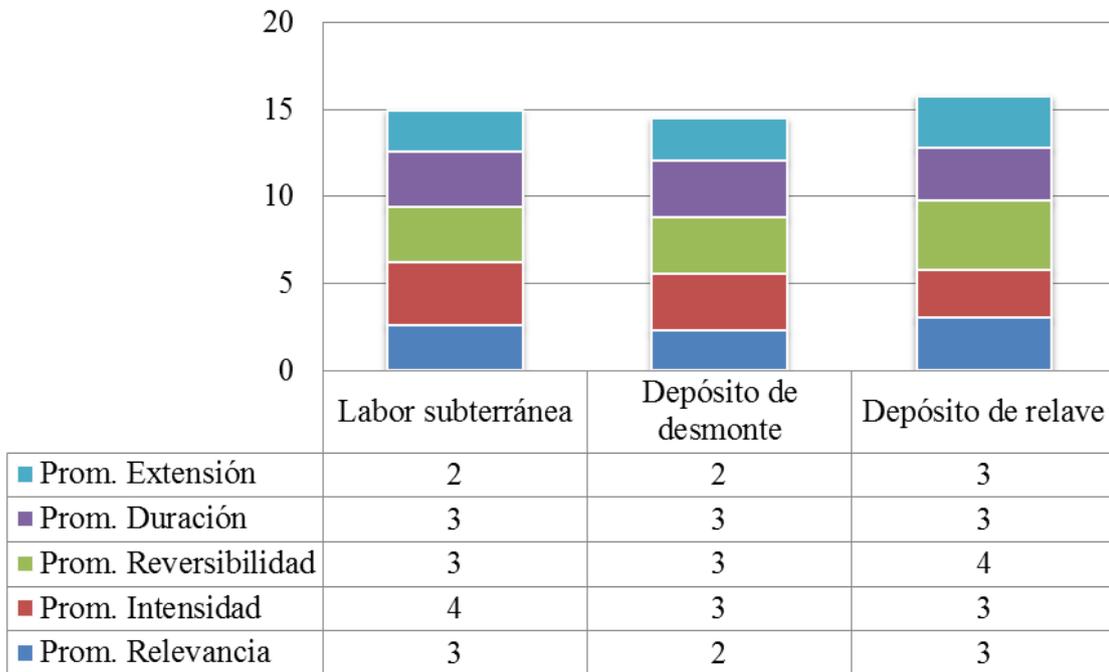


**Figura 12: Interacción de los efectos de los modos de fallo sobre la comunidad**

### 4.3.3 CARACTERÍSTICA DE LA INTERACCIÓN CON EL MEDIO AMBIENTE (CI<sub>M</sub>)

A continuación en la Figura 13 se muestra los promedios de características de interacción de los efectos sobre la sobre el medio ambiente. Los valores de interacción con el medio ambiente están en el rango de 1 a 5, donde los valores más bajos representan efectos insignificantes y bajos, mientras que los valores más altos representan efectos altos y significativos.

Donde se observa que los efectos de fallos tienen una interacción significativa con el medio ambiente y similar para todos los componentes del cierre mina.

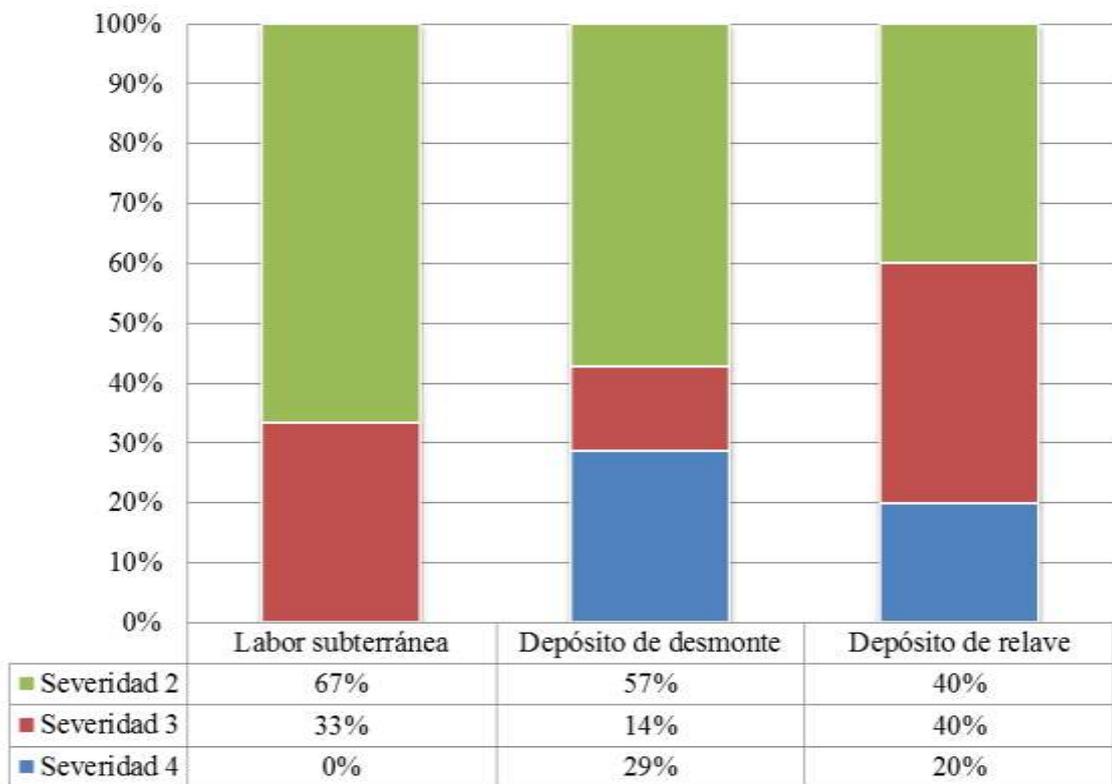


**Figura 13: Interacción de los efectos de los modos de fallos sobre el medio ambiente**

#### 4.3.4 SEVERIDAD DE LA CONSECUENCIA (SE)

A continuación en la Figura 14 se muestra los niveles de severidad de los efectos de modos de fallo.

Donde se observa que los niveles de mayor severidad se relacionan con los efectos de fallo del depósito de relave, mientras que los niveles de menor severidad se relacionan con los efectos de fallo de labores subterráneas.



**Figura 14: Severidad de efectos de modos de fallo de componentes mineros en escenario de cierre final**

#### **4.4 DE LA FASE DE GABINETE 3: CATEGORIZACIÓN DE PROBABILIDAD**

##### **4.4.1 PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DEL EVENTO NATURAL (PEN)**

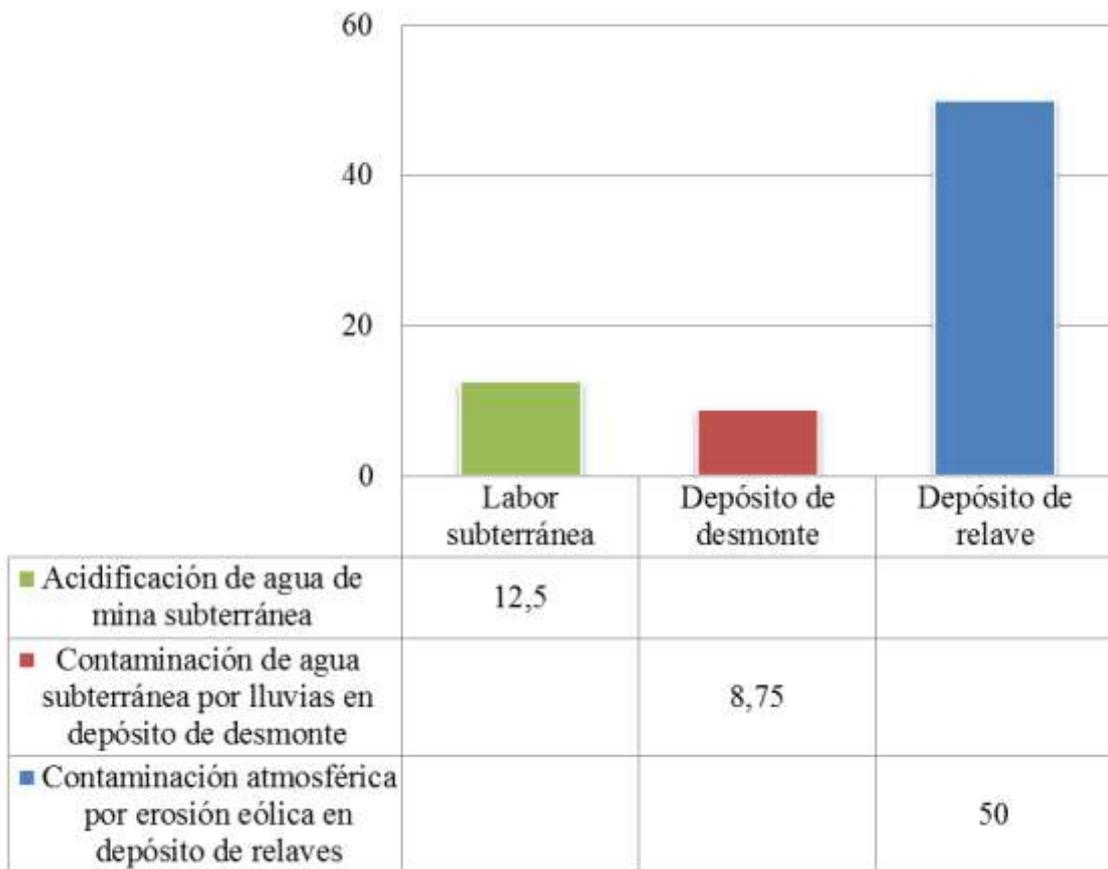
De acuerdo a la historia sísmica registrada en la región expresada en el mapa de calificación de provincias según niveles de peligros sísmicos elaborado por la Comisión Multisectorial de Reducción de Riesgos en el Desarrollo; la provincia de Melgar de la región Puno tiene un nivel bajo de peligro sísmico.

En cuanto a la probabilidad por aspectos hídricos, cabe denotar que todas las estructuras de alto riesgo son diseñadas según lo establecido por la normatividad peruana, para sismos con tiempo de retorno mínimo de 500 años, y tormentas con un evento de 24 horas en periodo de retorno mínimo de 200 años.

#### 4.4.2 FACTOR TÉCNICO OPERACIONAL DEL COMPONENTE (FT)

Los factores técnicos operacionales, atribuidos a los modos de fallo fueron calculados a partir de criterios técnicos detallados en el Anexo 4.

Según su estado actual, solo se atribuye la influencia de los siguientes factores mostrados en la Figura 15, los cuales están en una escala de 0 a 100 donde los valores mayores cercanos a 100 implican mayor influencia en la probabilidad de ocurrencia del fallo.

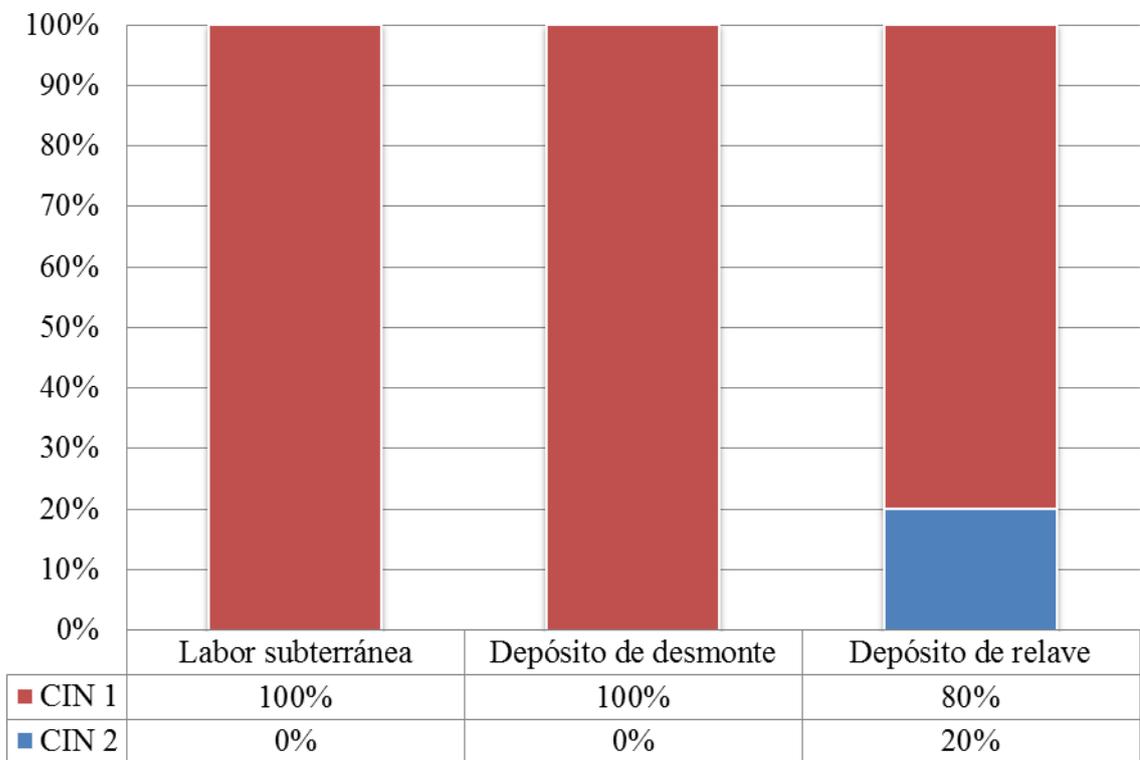


**Figura 15: Factor técnico operacional de modos de fallo significativo de componentes mineros**

#### 4.4.3 CONDICIÓN DE LA INSTALACIÓN (CIN)

A continuación en la Figura 16 se muestra los niveles de las condiciones de instalación. Donde los valores mayores cercanos e iguales a CIN 5, implican mayor probabilidad de ocurrencia del fallo, considerando la efectividad de la medida de cierre con enfoque en la probabilidad.

Donde se observa que las condiciones de la instalación del depósito de relave tienen mayor probabilidad de fallo a comparación de los componentes labores subterráneas y depósitos de desmonte.

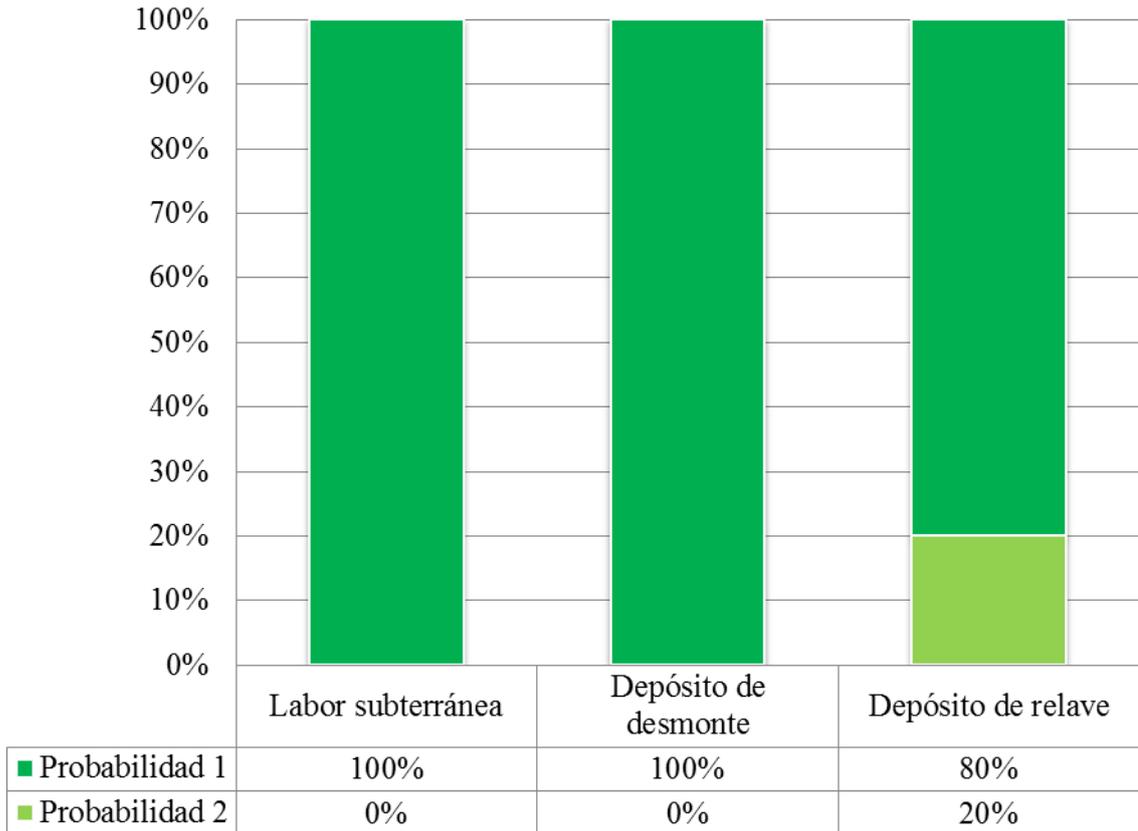


**Figura 16: Condición de la instalación de los componentes mineros**

#### 4.4.4 PROBABILIDAD DEL MODO DE FALLO

A continuación en la Figura 17 se muestra los niveles de probabilidad de ocurrencia de modos de fallo.

Donde se observa que la probabilidad de ocurrencia de los modos de fallo en el depósito de relave es mayor a comparación con las labores subterráneas y los depósitos de desmonte.

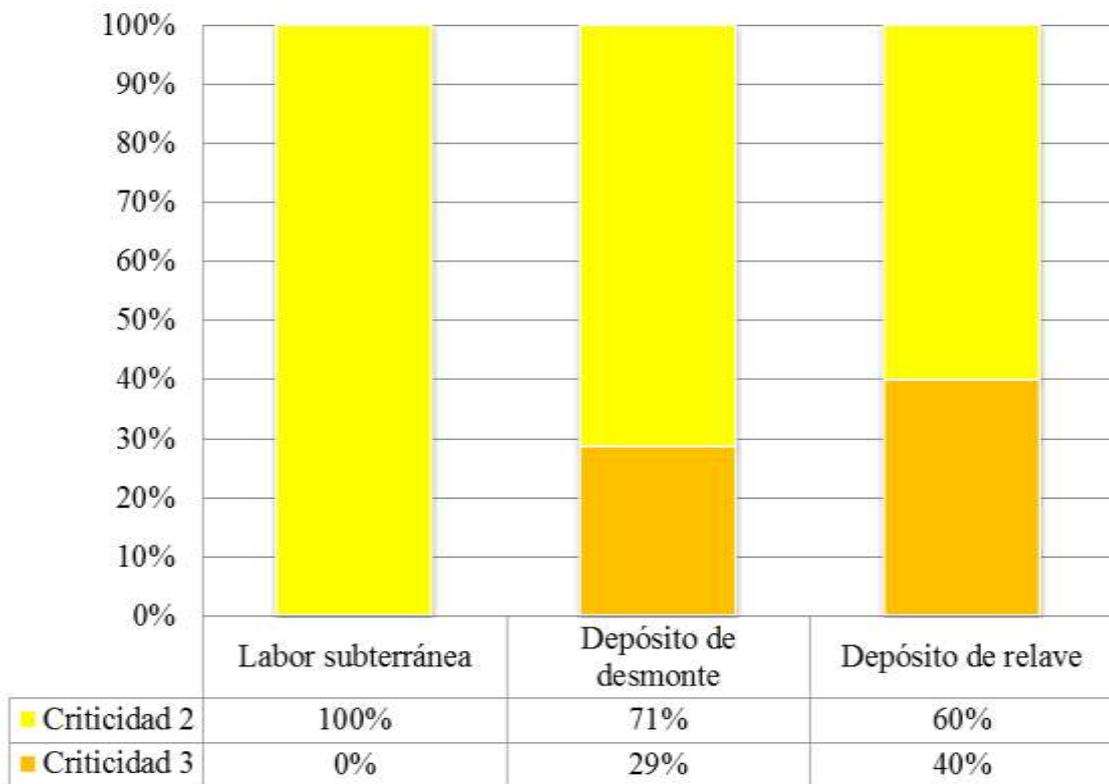


**Figura 17: Probabilidad de ocurrencia de modo de fallos significativos de componentes mineros**

#### 4.4.5 ANALIZAR LA CRITICIDAD DE LOS MODOS DE FALLO FUNCIONALES

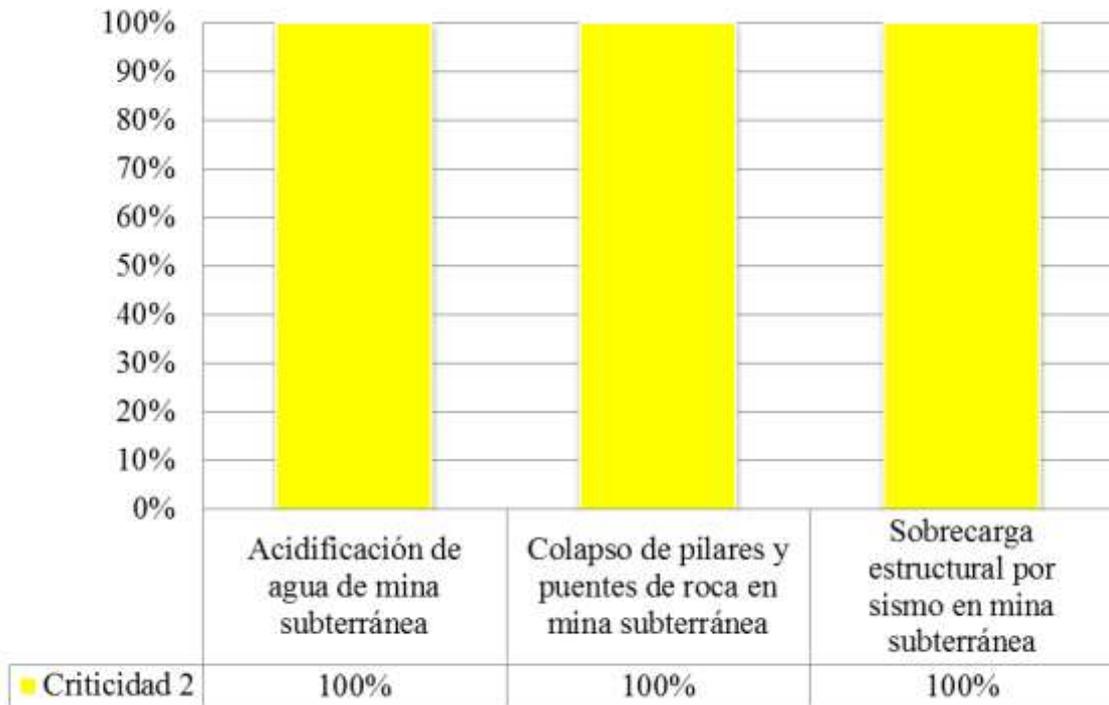
A continuación en la Figura 18 se muestra los niveles de criticidad de los modos de fallo de los componentes agrupados. Donde se observa a modo resultante, que los niveles más elevados de criticidad funcional actual están en los depósitos de desmonte y depósito de relave.

De modo resultante, en conjunto y actualmente todos los componentes en escenario de cierre final presentan una criticidad tolerable.



**Figura 18: Criticidad de los modos de fallo significativos de componentes mineros en escenario de cierre final**

A continuación en la Figura 19 se muestran los niveles de criticidad de los modos de fallo de labores subterráneas. Donde se observa en conjunto el nivel de criticidad 2 el cual es aceptable para cada modo de fallo de todas las labores subterráneas en escenario de cierre final, tal como se detalla en la Tabla 20.



**Figura 19: Criticidad de los modos de fallo de labores subterráneas en escenario de cierre final**

**Tabla 20: Criticidad de los modos de fallo de labores subterráneas en escenario de cierre final**

Nombre	Modo de fallo	Criticidad del modo de fallo
Bocamina 05	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Bocamina 06	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2

... continuación”

<b>Nombre</b>	<b>Modo de fallo</b>	<b>Criticidad del modo de fallo</b>
Bocamina 11	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Bocamina 23	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Bocamina 28	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Bocamina 32	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Bocamina 33	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Bocamina 34	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Bocamina 91	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Bocamina 92	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2

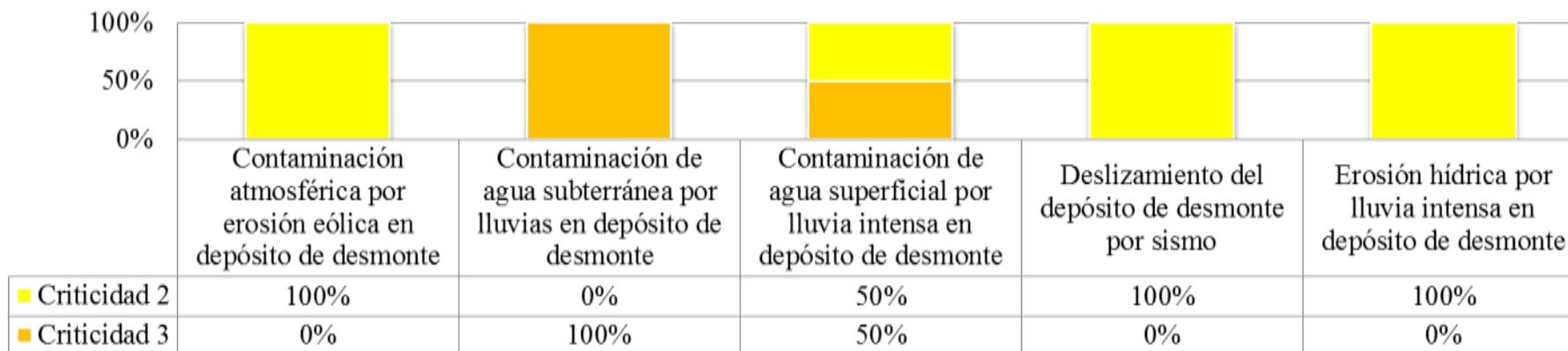
... continuación”

<b>Nombre</b>	<b>Modo de fallo</b>	<b>Criticidad del modo de fallo</b>
Bocamina ingreso rampa Nv. 4523	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Chimenea 11	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Chimenea 15	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Chimenea 15A	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Chimenea 90	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Chimenea 17	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Chimenea 21	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2

... continuación”

<b>Nombre</b>	<b>Modo de fallo</b>	<b>Criticidad del modo de fallo</b>
Chimenea 39	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Chimenea 56	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Chimenea 63	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2
Chimenea 84	Colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea	Criticidad 2
	Sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea	Criticidad 2
	Acidificación de agua de mina subterránea	Criticidad 2

A continuación en la Figura 20 se muestran los niveles de criticidad de los modos de fallo de depósitos de desmorte. Donde se observa en conjunto hasta un nivel de criticidad tolerable para cada modo de fallo analizado, tal como se detalla en la Tabla 21.

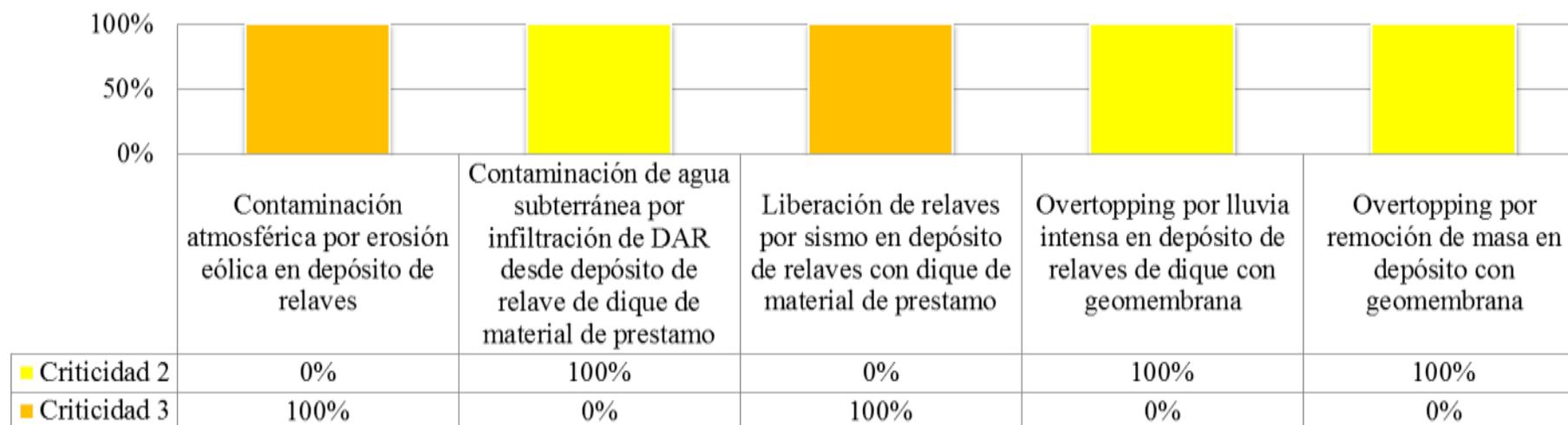


**Figura 20: Criticidad de los modos de fallo de depósitos de desmorte en escenario de cierre final**

**Tabla 21: Criticidad de los modos de fallo de depósitos de desmorte en escenario de cierre final**

Nombre	Modo de fallo	Criticidad del modo de fallo
Depósito de desmorte cancha N° 35	Contaminación de agua subterránea por lluvias en depósito de desmorte	Criticidad 3
	Contaminación atmosférica por erosión eólica en depósito de desmorte	Criticidad 2
	Contaminación de agua superficial por lluvia intensa en depósito de desmorte	Criticidad 3
	Erosión hídrica por lluvia intensa en depósito de desmorte	Criticidad 2
	Deslizamiento del depósito de desmorte por sismo	Criticidad 2
Depósito de mineral cancha N° 37	Contaminación atmosférica por erosión eólica en depósito de desmorte	Criticidad 2
	Contaminación de agua superficial por lluvia intensa en depósito de desmorte	Criticidad 2

A continuación en la Figura 20 se muestran los niveles de criticidad de los modos de fallo de depósitos de relave. Donde se observa hasta un nivel de criticidad tolerable para cada modo de fallo analizado, tal como se detalla en la Tabla 21.



**Figura 21: Criticidad de los modos de fallo del depósito de relaves en escenario de cierre final**

**Tabla 22: Criticidad de los modos de fallo de depósitos de desmonte en escenario de cierre final**

Nombre	Modo de fallo	Criticidad del modo de fallo
Depósito de relaves y diques de bofedal III	Liberación de relaves por sismo en depósito de relaves con dique de material de préstamo	Criticidad 3
	Overtopping por lluvia intensa en depósito de relaves de dique con geomembrana	Criticidad 2
	Overtopping por remoción de masa en depósito con geomembrana	Criticidad 2
	Cont. de agua subterránea por infiltración de DAR desde depósito de relave de dique de material de préstamo	Criticidad 2
	Contaminación atmosférica por erosión eólica en depósito de relaves	Criticidad 3

#### **4.5 DEL PRESUPUESTO PRESUPUESTO**

- Según la actualización del plan de cierre 2012 de la unidad minera Holy; la garantía financiera para el cierre final totaliza al 2015 un valor presente de US\$31,5 millones, aproximado dentro de un rango de  $\pm 20\%$  equivalente a US\$6,3 millones. La garantía esta compuesta por depósitos anuales para el cierre final (del 2016 al 2019) el año 2016 US\$6,3 millones, año 2017 US\$7,8 millones, año 2018 US\$3,4 millones, año 2019 de US\$4,9 millones dólares y para el post cierre (del 2020 al 2024) en el año 2020 US\$1 millón, año 2021 US\$1 millón, año 2022 US\$0,6 millones, año 2023 US\$0,6 millones y año 2024 US\$0,9 millones.
- El presupuesto estimado del análisis de riesgo con personal ad honoren totaliza de 8450 soles y con una duración de la ejecución de 12 meses, tal como se presentó en Tablas 16 y 17. Sin embargo, considerando 5000 soles como honorarios básicos / mensuales para el servicio consultoría de análisis de riesgo de sus componentes, el costo ascenderá a 68450 soles, equivalente a US\$19,6 miles, según el tipo de cambio a febrero del 2016 referido en [www.preciodolar.com](http://www.preciodolar.com).
- Los costos de tareas de mantenimiento derivados del análisis de riesgo, permitirán una aproximación menor al rango  $\pm 20\%$  y mejor enfoque en los factores técnicos de mayor importancia para la correcta funcionalidad del componente minero.
- Los costos por remediación son muy elevados y superan las montos de garantías anuales, así tenemos un artículo publicado en página web [www.northernminer.com/news/imperial-metals-raises-50-million/1003439293/](http://www.northernminer.com/news/imperial-metals-raises-50-million/1003439293/), donde se informó que Imperial Metals presupuestó la remediación de Mount Polley US\$67,4 millones a junio de 2015, luego 11 meses del accidente.

#### **4.6 ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO**

Según la IEC 2009, el mantenimiento se agrupa en 4 tareas:

- Monitorización de la condición,
- renovación programada,
- reemplazamiento programado y,
- tareas de búsqueda de fallos.

Por lo cual a modo conceptual se proponen las siguientes tareas en función a los resultados de modos de fallo con criticidad más alta.

- Búsqueda mensual de drenajes en tapones herméticos de bocaminas y tapas de chimenea,
- renovación semestral de la cobertura vegetal,
- renovación de trimestral de canales y pozas,
- monitoreo mensual del potencial neto de neutralización del desmonte,
- búsqueda mensual de drenajes en el depósito de desmonte,
- reemplazo en el primer trimestre los canales de derivación y esorrentía que no cumplan el criterio de diseño de crecida máxima probable en el depósito de desmonte,
- monitoreo mensual de la calidad aguas en pozos piezométrico, ubicado aguas abajo del depósito de desmonte,
- reemplazo en el primer trimestre de evento de rebose del depósito de aguas de contacto derivadas del depósito de desmonte,
- monitoreo mensual de la cota de relave en contacto con el dique del depósito de relaves,
- monitoreo mensual del nivel de aguas claras en el depósito de relaves,
- monitoreo mensual del contenido de finos en arena en el dique del depósito de relaves,
- monitoreo mensual del niveles piezométricos en el dique de depósito de relaves,
- monitoreo mensual de la densidad relativa del dique de depósito de relaves,
- monitoreo mensual del ángulo de talud aguas abajo del dique de depósito de relaves,
- búsqueda mensual de afloramientos de agua en el dique de depósito de relaves y,
- monitoreo trimestral de material erosionable y humedad superficial de relaves depositados.

## V. CONCLUSIONES

Luego de analizar el riesgo funcional de los componentes mineros destinados a cierre final en la unidad minera HOLY de la empresa minera OFIR, usando los métodos análisis de modos de fallos, efecto y criticidad - FMECA y análisis de decisiones multicriterio - MCDA (IEC 2009), se concluye:

- Los componentes en escenario final comprenden 11 bocaminas, 10 chimeneas, 2 depósitos de desmonte y 1 depósito de relave.
- El 100% de modos de fallo de labores subterráneas, 71% de modos de fallo de depósitos de desmonte y 60% de modos de fallo del depósito de relaves tienen criticidad 2.
- El 29% de modos de fallo de depósitos de desmonte y el 40% de modos de fallo de depósito de relave tienen criticidad 3.
- Los modos de fallo con criticidad 3 que requieren mayor atención son:
  - Contaminación de agua subterránea por lluvias en depósito de desmonte,
  - contaminación de agua superficial por lluvia intensa en depósito de desmonte,
  - liberación de relaves por sismo en depósito de relaves con dique de material de préstamo y
  - contaminación atmosférica por erosión eólica en depósito de relaves.
- Los resultados del análisis de riesgo forman parte del diagnóstico de línea base para formular la programación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad de los componentes mineros en cierre.
- La presente metodología de análisis de riesgo funcional permite analizar los efectos y la influencia de la efectividad de las medidas de cierre sobre el medio ambiente y la comunidad.
- El análisis de riesgo funcional permite focalizar atención a componentes con mayor criticidad de los modos de fallo.
- La importancia del uso del proceso de análisis jerárquico para la toma de decisiones a partir de múltiples factores técnicos brindando una decisión final con mínima influencia de prejuicio.

- La importancia del análisis de la criticidad para asegurar la funcionalidad óptima de las medidas de cierre de los componentes mineros.
- La falta del análisis de riesgo y/o evaluación de riesgo, genera consecuencias de la subestimación de los modos de fallo resultando en catástrofes con efectos de alta severidad para la comunidad y al medio ambiente.
- Alternativamente existen otras metodologías de análisis presentadas por la ISO/IEC, sin embargo se considera que los análisis combinados FMECA y MCDA brinda un mejor análisis por su enfoque en los efectos, modos de fallo, severidad, probabilidad objetiva y criticidad.

Finalmente se concluye que el análisis de fallo, efectos, criticidad y el análisis multicriterio constituyen herramientas fundamentales y muy útiles en la gestión de riesgos ambientales, con fines de determinar la criticidad funcional de componentes mineros de cierre dentro del planeamiento de operaciones mineras.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Utilizar esta metodología como base para el planeamiento de garantía financiera y focalizar los recursos en componentes con modos de fallo de mayor criticidad.
- Mejorar los factores técnicos atribuidos a modos de fallos, aumentando más criterios técnicos con el fin de mejorar la aproximación en la asignación del nivel de criticidad.
- Desarrollar un aplicativo computacional para el cálculo FMECA y MCDA para fines de cálculos libres de errores y monitoreo de la criticidad de los componentes de cierre.
- Dentro de la evaluación de riesgos, posterior al presente análisis de riesgo, desarrollar el análisis costo beneficio para determinar la viabilidad de alternativas de mitigación de la criticidad sin entrar a elevar los costos planificados de mantenimiento y monitoreo en el escenario de post cierre.

Finalmente se recomienda a empresas mineras y autoridades competentes Ministerio del Ambiente y Ministerio de Energía y Minas incluir el análisis de riesgo funcional en cada actualización del plan de cierre de minas como base para la toma de decisiones de tareas de mantenimiento y monitoreo post cierre.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aduvire, H. Aduvire, O. 2000. Cierre y abandono de labores mineras para la protección de la salud y el medio ambiente. Madrid, ES, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas – UPM. 3 p.
- Arratia, M. 2015. Gestión temprana del mantenimiento. Lima, PE. v. 450 (entre p. 62 y 64) Minería publicación oficial del Instituto de Ingenieros de Minas del Perú.
- CENEPRED (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, PE). 2015. Manual para la Evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales – 2da Versión. Lima, PE. 245 p.
- Collantes, J. 2013. Importancia de la ingeniería de confiabilidad en la estrategia de la gestión de los Activos. Congreso nacional de ingeniería mecánica eléctrica y ramas afines – CONIMERA, 2013-1. Lima, PE. 11 p.
- Colwell, D. Henker, T. Ho, J. 1995. Real Options Valuation of Australian Gold Mines and Minin Companies. Sydney, AU. 32 p.
- DMP (Department of Mines and Petroleum). EPA (Environmental Protection Authority). 2011. Guidelines for Preparing Mine Closure Plans. Western Australia, AU. 78 p.
- Du Plessis, A. Brent, A. 2006. Development of a risk-based mine closure cost calculation model. Johannesburgo, ZA. v. 106 (entre p. 443 y 450). Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- ENVSEC (Environment Security). 2005. Mining for closure: policies and guidelines for sustainable mining practice and closure of mines. Napoca, RO. 120 p.
- Garfi, M., and Ferrer-Marti, L. (2011). Decision-making criteria and indicators for water and sanitation projects in developing countries. Water Science and Technology, 64(1), 83-101.
- Golder Associates. 2003. Evolución de la práctica internacional para el planeamiento del cierre de minas. Alberta, CA. 10 p.

- Golder Associates. 2008. Manual de evaluación de riesgos de faenas mineras abandonadas o paralizadas. Santiago, CL. 501 p.
- Heikkinen, P. Noras, P. Salminen, R. 2008. environmental techniques for the extractive industries - Mine Closure Handbook, Outokumpu, FI. 107 p.
- Hillson, D. Hulett, D. 2004. PMI Global Congress Proceedings. Calculando probabilidades de riesgos: Métodos Alternativos. Praga, PL. 8 p.
- IBM (International Business Machines). 2008. Guía Breve de IBM SPSS Statistics 22. Barcelona, ES. 102 p.
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, CR)/CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CR). 2000. Redacción de referencias bibliográficas: normas técnicas del IICA y CATIE. Guatemala, CR. Consultado 01 nov 2014. Disponible en [www.catie.ac.cr](http://www.catie.ac.cr)
- ICMM (Consejo Internacional de Minería y Metales, UK). 2008. Planificación del cierre integrado de minas: equipo de herramientas. Londres, UK. 86 p.
- IEC (International Electrotechnical Commission, SZ). 2006. IEC 60812:2006 Analysis techniques for system reliability – procedure for failure mode and effects analysis FMEA (Técnicas de análisis para sistemas de confiabilidad – Procedimiento de análisis de modo de fallos y efectos). 2ª Ed. Ginebra, SZ. 93 p.
- IEC (International Electrotechnical Commission, SZ). 2009. IEC 60300-3-11:2009 Dependability management - Part 3-11: Application guide - reliability centred maintenance (Gestión de la Confiabilidad Sección 3-11 Guía de Aplicación – Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad). 2ª Ed. Ginebra, SZ. 94 p.
- IEC/ISO (International Electrotechnical Commission / International Organization for Standardization, SZ). 2009. IEC/ISO 31010:2009 Risk management – risk assessment techniques (Gestión del riesgo - Técnicas de valoración de riesgo). 1ª Ed. Ginebra, SZ. 176 p.
- ISO (International Organization for Standardization, SZ). 2009. ISO 73:2009 Risk management - vocabulary (Gestión del riesgo - Vocabulario). 1ª Ed. Ginebra, SZ. 15 p.
- ISO (International Organization for Standardization, SZ). 2009. ISO 31000:2009 Risk management - Principles and guidelines (Gestión del riesgo - principios y directrices). 1ª Ed. Ginebra, SZ. 24 p.

- Keeney, R. 1992. Value-focused thinking: A Path to creative decision making. Harvard University Press. Cambridge, EU.
- MINAM (Ministerio del Ambiente, PE). 2010. Guía de evaluación de riesgos ambientales. Lima, PE. 117 p.
- MINEM (Ministerio de Energía y Minas, PE). 2003. Ley que regula el cierre de minas. Aprobado por Ley 28090. Lima. PE. 3 p.
- MINEM (Ministerio de Energía y Minas, PE). 2005. Reglamento para el cierre de minas, aprobado por DS 033-2005 EM. Lima, PE. 31 p.
- MINEM (Ministerio de Energía y Minas, PE). 2006. Guía para la elaboración de planes de cierre de minas. Lima, PE. 62 p.
- MINEM (Ministerio de Energía y Minas, PE). 2010. Decreto Supremo N° 055-2010-EM del 22 de agosto 2010. Reglamento de seguridad y salud ocupacional y otras medidas complementarias en minería. Lima, PE.
- MINEM (Ministerio de Energía y Minas, PE). 2015. Resolución Ministerial N° 102-2015-MEM/DM del 5 de marzo 2015. Actualizan el inventario inicial de pasivos ambientales mineros. Lima, PE.
- MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, PE). 2013. NTC 004-2013 del 04 de junio del 2013. Requisitos para efectuar evaluaciones de seguridad operacional para proveedores de servicios de tránsito aéreo y explotadores de aeródromos. Lima, PE.
- Montgomery, D. Peck, E. Goffrey, G. 2004. introducción al análisis de regresión lineal. Distrito Federal, MX. 588 p.
- Oyarzún, J. 2008. Plan de cierre mineros - curso resumido. Santiago, CL. 119 p. Consultado nov. 2014. Disponible en [www.aulados.net](http://www.aulados.net)
- Robertson, A. Shaw, S. 2006. Mine closure. Vancouver, CA. 55 p.
- Rodríguez, R. Oldecop, L. Linares, R. Salvado, V. 2009. Los grandes desastres medioambientales producidos por la actividad minero-metalurgica a nivel mundial: causad y consecuencias ecológicas y sociales. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Revista de Instituto de Investigaciones FIGMMG, Vol. 12 N° 24, 7-25, Lima, PE. 19 p.
- Saaty T. 1980. The analytic hierarchy process, McGraw-Hill Book Co., N.Y.
- Saaty, T. 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. Int J. Services Sciences, Vol. 1, N° 1. Pittsburg, US. 16 p.

- SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería)/Arcadis, CL. 2014. Guía metodológica evaluación de riesgos para el cierre de faenas mineras. Providencia, CL. 137 p.
- Szymanski, M. Davies, M. 2004. Design criteria and safety evaluations at closure. Burnaby, CA. 12 p.
- Toskano, G. 2005. El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores: aplicación en la selección del proveedor para la empresa gráfica comercial MYE S.R.L. Lic. Investigación Operativa. Lima, PE. Facultad de Ciencias Matemáticas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 88p.
- UNALM (Universidad Nacional Agraria La Molina, PE). 2014. Reglamento de tesis. Lima, PE. 38p.

## **VIII. ANEXOS**

### **ANEXO 1: LEGISLACIÓN AMBIENTAL APLICABLE**

#### **Legislación ambiental general aplicable**

La autoridad ambiental y órgano rector del Sistema Nacional de Gestión Ambiental en el Perú es el Ministerio del Ambiente (MINAM) que nace con el objetivo de diseñar, establecer, ejecutar y supervisar la política nacional del ambiente; además, de haber sustituido al Consejo Nacional del Ambiente, que fue la autoridad ambiental nacional hasta la creación del MINAM.

A pesar de la creación del MINAM como nueva autoridad ambiental nacional, el ejercicio sectorial de las funciones ambientales establecidas por la Ley Marco para el Crecimiento de la Inversión Privada, Decreto Legislativo N° 757, modificada por la Ley 26734, aún se mantiene bajo responsabilidad de los diferentes Ministerios. Además, conforman la estructura gubernamental instituciones trans-sectoriales como la Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud y la Dirección General de Asuntos Ambientales Agrarios del Ministerio de Agricultura. Para el caso de la aprobación de los Planes de Cierre de Minas, la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros del Ministerio de Energía y Minas (MINEM) es la autoridad ambiental competente y el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental del MINAM, es el organismo fiscalizador.

Constitución Política del Perú (30 de diciembre 1993), norma peruana de mayor jerarquía, la cual establece los derechos de la persona humana en su primer título y segundo artículo, entre los cuales se destaca que “toda persona tiene derecho a la paz, a la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida”. Asimismo, el título tercero de la Constitución Política del Perú, señala en su capítulo segundo las bases respecto del tratamiento del medio ambiente y los recursos naturales. Los recursos naturales, renovables y no renovables, son patrimonio de la Nación. El Estado es soberano en su aprovechamiento y promueve el uso sostenible de sus recursos naturales. Por ley orgánica, se fijan las condiciones de su uso y

otorgamiento a particulares. La concesión otorga a su titular un derecho real, sujeto a dicha norma legal.

Ley General del Ambiente - Ley 28611 (15 de octubre del 2005) y modificada por Decreto Legislativo (D.L.) N° 1055, Ley N° 29325 y Ley N° 30011, derogó el Código de Medio Ambiente y Los Recursos Naturales, el que actualmente constituye la norma ordenadora del marco normativo legal para la gestión ambiental en el Perú. Esta Ley establece los principios y normas básicas para asegurar el efectivo ejercicio del derecho a un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, así como el cumplimiento del deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la población y lograr el desarrollo sostenible del país. La cual establece en su noveno artículo que “el causante de la degradación del ambiente y de sus componentes, sea persona natural o jurídica, pública o privada, está obligado a adoptar inexcusablemente las medidas para su restauración, rehabilitación o reparación según corresponda o, cuando lo anterior no sea posible, a compensar en términos ambientales los daños generados, sin perjuicio de otras responsabilidades administrativas, civiles o penales que hubiera lugar”. Así también promueve la gestión ambiental tal como se establece en su septuagésimo sexto artículo que “los titulares de operaciones adopten sistemas de gestión ambiental acordes con la naturaleza y la magnitud de sus operaciones con la finalidad de impulsar la mejora continua de sus niveles de desempeño ambiental”.

Ley Marco para el Crecimiento de la Inversión Privada - Decreto Legislativo N° 757 (13 de noviembre de 1991) y sus modificatorias Ley N° 26734 y Ley N° 26786, establece que las autoridades sectoriales competentes para conocer sobre los asuntos relacionados con la aplicación de las disposiciones de la Ley General del Ambiente, son los Ministerios o los Órganos de Fiscalización, según sea el caso, de los sectores correspondientes a las actividades que desarrolla la empresa. Así tenemos que para toda empresa minera, el MINEM es la autoridad ambiental competente.

La Ley General de Salud - Ley N° 26842 (20 de julio de 1997) y sus modificatorias Ley N° 29973 y Ley N° 29989, establece que la protección del ambiente es responsabilidad del Estado y de las personas naturales y jurídicas, quienes tienen la obligación de mantenerlo dentro de los estándares que, para preservar la salud de las personas, establece la Autoridad de Salud competente. Asimismo, la norma indica que toda persona natural o jurídica está

impedida de efectuar descargas de desechos o sustancias contaminantes en el agua, el aire o el suelo, sin haber adoptado las consideraciones ambientales que señalan las normas sanitarias y de protección del ambiente.

Ley Orgánica para el Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales - Ley N° 26821 (26 de junio de 1997), tiene como objetivo promover y regular el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, renovables y no renovables, estableciendo un marco adecuado para el fomento a la inversión, procurando un equilibrio dinámico entre el crecimiento económico, la conservación de los recursos naturales y del ambiente, y el desarrollo integral de la persona humana.

Ley Forestal y de Fauna Silvestre - Ley N° 27308, (16 de julio de 2000), y su Reglamento - Decreto Supremo (D.S.) N° 014-2001-AG (04 de agosto de 2001), que se encuentran vigentes a la fecha, tienen por objeto normar, regular y supervisar el uso sostenible y la conservación de los recursos forestales y de fauna silvestre del país, compatibilizando su aprovechamiento con la valorización progresiva de los servicios ambientales de bosque, en armonía con el interés social, económico y ambiental de la Nación.

Estas normas regulan, entre otras, las actividades de desboque y colecta de especies forestales y de fauna silvestre que se lleven a cabo durante la etapa de cierre de mina. Asimismo, el 22 de julio del 2011 se publicó la nueva Ley Forestal y de Fauna Silvestre, (Ley N° 29763), sin embargo esta norma aún no está vigente, toda vez que su vigencia está condicionada a la publicación de su reglamento. Una vez que esta nueva Ley entre en vigencia la Ley N° 27308 y su Reglamento quedarán derogados.

Ley sobre la Conservación y Aprovechamiento Sostenible de la Diversidad Biológica - Ley N° 26839 (16 de julio de 1997) y su Reglamento aprobado por el D.S. N° 068-2001-PCM (21 de junio de 2001), regulan la conservación de la diversidad biológica y la utilización sostenible de sus competentes. Del mismo modo, en el artículo 52° del reglamento de la referida Ley, se establece que las Evaluaciones de Impacto Ambiental, Programas de Adecuación y Manejo Ambiental y cualquier otro instrumento técnico elaborado para desarrollar actividades productivas o de aprovechamiento de recursos, incluyendo el acceso a los recursos genéticos, incluirán medidas requeridas para la conservación de la diversidad biológica y el mantenimiento de la integridad de los ecosistemas.

La Ley General del Patrimonio cultural de la Nación - Ley N° 28296 (22 de julio de 2004), y su Reglamento aprobado por el D.S. N° 011-2006-ED (01 de junio de 2006), regulan, entre otros aspectos, la protección, promoción, propiedad y régimen legal y el destino de los bienes que constituyen el Patrimonio Cultural de la Nación, conformado tanto por bienes materiales (inmuebles y muebles), como inmateriales. Estas normas se aplican sobre los bienes que constituyen el Patrimonio Cultural de la Nación que estén ubicados en las áreas donde se desarrollen las actividades de cierre de minas. Asimismo, cabe resaltar que mediante R.D. N° 004-2000-ED, se aprueba el Reglamento de Investigaciones Arqueológicas el mismo que regulara los instrumentos a través de los cuales se descarta la existencia de restos arqueológicos.

La Ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental, Ley N° 29325 (05 de marzo de 2009), modificada por la Ley N° 30011, tiene por finalidad asegurar el cumplimiento de la legislación ambiental por parte de todas las personas naturales o jurídicas, así como supervisar y garantizar que las funciones de evaluación, supervisión, fiscalización, control y potestad sancionadora en materia ambiental, a cargo de las diversas entidades del Estado, se realicen de forma independiente, imparcial, ágil y eficiente. Mediante esta norma, se regula además las funciones del OEFA, así como de las Entidades de Fiscalización Ambiental (EFA), y se establecen los rangos por infracciones ambientales y las medidas correctivas que pueden ser aplicadas en estos casos.

### **Legislación ambiental sectorial aplicable**

Las principales disposiciones de protección ambiental aplicables al desarrollo de actividades mineras se encuentran en el Título Quince del “Texto Único Ordenado de la Ley General de Minería”, aprobado por D.S. N° 014-92-EM (02 de junio de 1992) y el “Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades Minero Metalúrgicas”, aprobado con el D.S. N° 016-93-EM (01 de mayo de 1993) y modificado con los Decretos Supremos: N° 059-93-EM (13 de diciembre de 1993) y N° 022-2002-EM (04 de julio de 2002) y en el D.S. N° 078-2009-EM (08 de noviembre de 2009) en el cual se implementan medidas de remediación ambiental a cargo del Titular Minero que haya realizado actividades y/o ejecutado proyectos relacionados con actividades mineras previstas en la Ley General de Minería.

El Texto Único Ordenado de la Ley General de Minería - D.S. N° 014-92-EM (02 de junio de 1992), constituye la norma principal que rige las actividades mineras, incluyendo la prospección, exploración, explotación (tanto subterránea como superficial, incluyendo canteras y operaciones de dragado), procesamiento de minerales, metalurgia extractiva, transporte de minerales por medios continuos y comercialización de minerales, disponiéndose ésta como el marco de definición de las actividades del cierre. El título quince de la Ley General de Minería establece el marco para regulaciones ambientales aplicables a todas las actividades mineras y metalúrgicas.

El Reglamento de Protección Ambiental para las Actividades Mineras, aprobado por D.S. N° 016-93-EM (28 de abril de 1993) y sus modificatorias, establece en su título quince que:

- Las acciones de previsión y control que deben realizarse para armonizar el desarrollo de las actividades minero – metalúrgicas con la protección del medio ambiente;
- proteger el medio ambiente de los riesgos resultantes de los agentes nocivos que pudiera generar la actividad minera metalúrgica, evitando que sobrepasen los niveles o límites máximos permisibles; y
- fomentar el empleo de nuevas técnicas y procesos relacionados con el mejoramiento del medio ambiente.

Además, este reglamento ambiental minero establece que el titular de la actividad minero-metalúrgica es responsable por las emisiones, vertimientos y disposición de desechos al medio ambiente que se produzcan como resultado de los procesos efectuados en sus instalaciones. Por esta razón, es su obligación evitar e impedir que aquellos elementos y/o sustancias que por sus concentraciones y/o prolongada permanencia puedan tener efectos adversos en el medio ambiente, sobrepasen los niveles o límites máximos permisibles establecidos. Respecto de la ejecución de medidas de cierre para las operaciones, el D.S. N° 016-93-EM, únicamente estableció el mandato de presentar un Plan de Cierre, cuando se está ante el supuesto de cierre temporal o definitivo, señalando que dicho plan debe incluir las medidas a adoptar “para evitar efectos adversos al medio ambiente por efectos de los residuos sólidos, líquidos o gaseosos que puedan existir o puedan aflorar en el corto, mediano o largo plazo”. Además de agregar que tales medidas debían verificar el cumplimiento de las disposiciones contenidas en dicho Decreto Supremo. No existía una

regulación especial que regulara esta importante etapa en el ciclo de vida de un proyecto minero, hasta la promulgación de la Ley y Reglamento para el Cierre de Minas.

Medidas de Remediación Ambiental - D.S. N° 078-2009-EM (08 de noviembre de 2009), incorporó al marco normativo minero ambiental, el instrumento denominado “Plan de Remediación Ambiental” (PRA), exigido a todo titular minero que haya realizado actividades y/o ejecutado proyectos de actividades mineras tales como exploración, explotación, beneficio, o actividades conexas o vinculadas a éstas, sin contar con la Certificación Ambiental correspondiente aprobada por la autoridad competente. El PRA debería ser ejecutado a fin de corregir la perturbación de las áreas utilizadas o afectadas por la ejecución de dichas actividades, de tal forma que alcancen, en la medida de lo posible, las características de un ecosistema compatible con un ambiente saludable y equilibrado para el desarrollo de la vida. De acuerdo al tercer artículo del D.S. N° 078-2009-EM, las medidas planteadas en el PRA pueden implicar, el retiro o demolición por cuenta y riesgo del titular, de las infraestructuras o construcciones realizadas sin contar con la Certificación Ambiental correspondiente, siempre que técnicamente resulte inviable su permanencia de acuerdo a lo que determine la Autoridad Competente. Esta norma se rige supletoriamente por: la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente; Ley N° 27446, Ley del SEIA; Ley N° 28090, Ley que regula el Cierre de Minas; y por la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General, así como por sus respectivas normas reglamentarias, modificatorias y complementarias, tales como el D.S. N° 016-93-EM y D.S. N° 028-2008-EM.

Estándar de Calidad Ambiental (ECA), según el artículo 31° de la Ley General del Ambiente, es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos o biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos.

Un ECA es de observancia obligatoria para el diseño de normas legales, políticas públicas; y para el diseño y aplicación de instrumentos de gestión ambiental, así como para el otorgamiento de la certificación ambiental. El numeral 31.4 de la Ley General del Ambiente establece que ninguna autoridad judicial o administrativa podrá hacer uso de los ECA, con el objeto de sancionar bajo forma alguna a personas naturales o jurídicas,

debiendo basarse las sanciones, en el incumplimiento de obligaciones a cargo de las personas naturales o jurídicas, incluyendo aquellas contenidas en los instrumentos de gestión ambiental.

- Aprueban los niveles máximos permisibles para efluentes líquidos minero-metalúrgicos – Resolución Ministerial (R.M.) N° 011-96-EM/VMM (13 de enero de 1996)
- Aprueban Niveles Máximos Permisibles de elementos y compuestos presentes en emisiones gaseosas provenientes de las Unidades Minero-Metalúrgicas - R.M. N° 315-96-EM/VMM (16 de julio de 1996)
- Aprueba los Estándares Nacionales de Calidad del Aire - N° 074-2001-PCM (24 de junio de 2001)
- Establecen Valor Anual de Concentración de Plomo - D.S. N° 069-2003-PCM (15 de julio de 2003)
- Aprueban el Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Ruido - D.S. N° 085-2003-PCM (30 de octubre de 2003)
- Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) para Radiaciones No Ionizantes - D.S. N° 010-2005-PCM (03 de febrero de 2005)
- Aprueba Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua – D.S. N° 002-2008-MINAM (31 de julio del 2008)
- Aprueban Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aire - D.S. N° 003-2008-MINAM (22 de agosto de 2008)
- Estándares de Calidad Ambiental para Suelo - D.S. N° 002-2013-MINAM (25 de marzo de 2013)

Límite Máximo Permisible (LMP), según el artículo 32° de la Ley General del Ambiente, es la medida de la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos que caracterizan a un efluente o a una emisión, que al ser excedido puede causar daños a la salud, bienestar humano y al ambiente. Su determinación corresponde al Ministerio del Ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el Ministerio del Ambiente y los organismos que conforman el Sistema Nacional de Gestión Ambiental. Los criterios para la determinación de la supervisión y sanción serán establecidos por dicho Ministerio.

- Aprueba Límites Máximos Permisibles para Efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales – D.S. N° 003-2010-MINAM (17 de marzo de 2010)
- Aprueba Límites Máximos Permisibles para Efluentes Líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas – D.S. N° 010-2010-MINAM (21 de agosto de 2010)

General de Residuos Sólidos - Ley N° 27314 (20 de julio de 2000), su Reglamento, aprobado por D.S. N° 057-2004-PCM (13 de agosto del 2004), su modificatoria D.L. N° 1065 (28 de junio del 2008) y complementado por Reglamento Nacional para la Gestión y Manejo de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos - D.S. N° 001-2012-MINAM (27 de junio del 2012) y Reglamento para la Gestión de los Residuos de las Actividades de Construcción y Demolición - D.S N° 003-2013-VIVIENDA, (08 de febrero de 2013), articulan la gestión y el manejo de los residuos sólidos bajo criterios de minimización y manejo integral. En esta norma se destaca el manejo de residuos semisólidos como los lodos y aceites usados. Asimismo, establece los derechos, obligaciones, atribuciones y responsabilidades de la sociedad en su conjunto, para asegurar una gestión y manejo de los residuos sólidos, de forma sanitaria y ambientalmente adecuada con sujeción a los principios de minimización, prevención de riesgos ambientales, protección de la salud y el bienestar de la persona humana. El manejo de residuos sólidos es parte integrante de los Planes de Cierre, los cuales deben considerar en el marco de esta Ley, acciones de prevención y control de riesgos sanitarios y ambientales, así como criterios de manejo, almacenamiento y disposición final. La Ley General de Residuos Sólidos establece que el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) regula y rige el transporte terrestre de residuos peligrosos.

Ley que Regula el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos - Ley N° 28256 (19 de junio de 2004) y su Reglamento D.S. N° 021-2008-MTC (10 de junio de 2008), tienen como objeto establecer las normas y procedimientos que regulan las actividades, procesos y operaciones del transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos, con sujeción a los principios de prevención y de protección de las personas, el medio ambiente y la propiedad. Debe indicarse que de conformidad con la Ley General de Residuos Sólidos, el generador y la compañía prestadora de servicios para residuos sólidos, responsable del transporte, tratamiento y disposición final de residuos sólidos peligrosos, firmarán un manifiesto de residuos peligrosos para cada entrega, hasta la llegada al sitio de

disposición final. Asimismo, los responsables del transporte, plantas de transferencia y de tratamiento y de disposición final, de toda clase de residuos sólidos deben presentar reportes mensuales, respecto a sus servicios al organismo local correspondiente del MINSA. Asimismo, presenta anualmente la Declaración Anual de Residuos Sólidos y el Plan de Manejo de Residuos Sólidos.

Reglamento Nacional de Administración del Transporte - D.S. N° 017-2009-MTC (21 de abril de 2009), establece que la Dirección General de Transporte por Carretera es el organismo dentro del MTC que está a cargo regular del transporte de residuos peligrosos.

Ley de Cierre de Minas - Ley N° 28090 (14 de octubre de 2003) y su Reglamento - D.S. N° 033-2005-EM (15 de agosto de 2005) y modificatoria D.S. N° 035-2006-EM (05 de julio de 2006), establece los Planes de Cierre de Minas como Instrumentos de Gestión Ambiental destinados a implementar medidas para rehabilitar las áreas utilizadas o perturbadas por las actividades mineras para que éstas alcancen características de ecosistema compatibles para el desarrollo de la vida y la preservación paisajística. Así también considera a la garantía financiera como el instrumento económico para el cumplimiento del referido Plan de Cierre.

Asimismo, el Reglamento de Cierre de Minas establece los procedimientos y condiciones, para la presentación, revisión, aprobación del Plan de Cierre y la correspondiente garantía financiera para su ejecución. La garantía financiera deberá cubrir los costos del Plan de Cierre y podrá establecerse utilizando cuatro modalidades:

- Modalidades contempladas en la Ley General del Sistema Financiero y del Sistema de Seguros y Orgánica de la Superintendencia de Banca y Seguros;
- En efectivo, mediante un depósito de dinero en las instituciones financieras;
- Un fideicomiso, según lo señalado en la Ley General del Sistema Financiero y del Sistema de Seguros y Orgánica de la Superintendencia de Banca y Seguros;
- Otras modalidades previstas en el Código Civil a satisfacción de la autoridad competente.

El Reglamento establece en su primer artículo como parte del objeto del mismo, el control de los riesgos y efectos sobre la salud, seguridad, ambiente, ecosistema y propiedad, que pudieran derivarse del cese de las operaciones de una unidad minera.

Durante las operaciones mineras, el Reglamento justifica en su cuarto artículo que se proceda a paralización (escenario de cierre temporal) a los componentes que estuvieren involucrados con operaciones que presenten riesgo inminente a la seguridad, salud y medio ambiente.

Acerca del contenido del Plan de Cierre, establece en su artículo décimo, el mismo deberá sujetarse a la atención prioritaria de los componentes de mayor riesgo.

Aprueban el uso de tasa de inflación y de descuento por parte de los titulares mineros a efectos de determinar el valor presente neto actualizado de los presupuestos del plan de cierre de minas – R.M. N° 262-2012-MEM/DM (13 junio de 2012), establece los métodos permitidos, el formato y la fórmula de cálculo de las tasas de interés y de descuento para determinar el programa de constitución de las garantías financieras.

Guía de Plan de Cierre de Minas - R.D. N° 130-2006-MEM-AAM (24 de abril de 2006), muestra una guía con el fin de apoyar técnicamente a los proponentes en la preparación de Planes de Cierre, de conformidad con la segunda disposición complementaria del Reglamento para el Cierre de Minas.

Régimen del Registro de Entidades Autorizadas a Elaborar Planes de Cierre de Minas - D.S. N° 016-2005-EM (04 de junio de 2005) y Registro de Entidades Autorizadas a Elaborar Planes de Cierre de Minas - D.S. N° 039-2005-EM (11 de octubre de 2005), definen los requisitos para las empresa consultoras y la cantidad mínima de profesionales para la elaboración planes de cierre de minas.

Guías Ambientales del Ministerio de Energía y Minas, a través de la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (DGAAM) ha proporcionado guías ambientales para todas las actividades del sector minero; entre las guías ambientales de importancia para las actividades de cierre de minas se pueden mencionar los siguientes:

- Guía de Plan de Cierre de Minas, R.D. N° 130-2006-MEM-AAM (24 de abril de 2006);
- Guía para la elaboración y revisión de Planes de Cierre de Minas, R.D. N° 002-96-EM/DGAA (08 de febrero de 1996);
- Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua, R.D. N° 004-94-EM/DGAA (02 de marzo de 1994);

- Guía Ambiental para el Manejo de Aguas en las Operaciones Minero-Metalúrgicas, R.D. N° 035-95-EM/DGAA (26 de setiembre de 1994);
- Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aire y Emisiones, R.D. N° 004-94-EM/DGAA (02 de marzo de 1994);
- Guía Ambiental para el Manejo de Problemas de Ruidos en la Industria Minera, R.D. N° 034-98-EM/DGAA (08 setiembre de 1998);
- Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido en Minas, R.D. N° 035-95-EM/DGAA (26 de setiembre de 1995);
- Guía Ambiental para Elaborar Programas de Adecuación y Manejo Ambiental, R.D. N° 015-95-EM/DGAA (31 de marzo de 1995);
- Guía Ambiental para Vegetación de Áreas Disturbadas por la Industria Minero-Metalúrgica, R.D. N° 035-95-EM/DGAA (26 de setiembre de 1995);
- Guía Ambiental para el Abandono y Cierre de Minas, R.D. N° 002-96-EM/DGAA (08 de febrero de 1996);
- Guía Ambiental para la Estabilidad de Taludes de Residuos Sólidos provenientes de Actividades Mineras, R.D. N° 034-98-EM/DGAA (12 de setiembre de 1998);
- Guía de Relaciones Comunitarias, R.D. N° 010-2001-EM/DGAA (25 de enero de 2001); y
- Guía para el Diseño de Coberturas de Depósitos de Residuos Mineros, R.D. N° 282-2007-EM/AAM (07 de setiembre de 2007).

## ANEXO 2: GLOSARIO DE TÉRMINOS

Las definiciones aplicables a la metodología de valoración de gestión de cierre de minas están basadas en IEC 60300-3-11 Gestión de la Confiabilidad, Sección 3-11 Guía de Aplicación – Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, ISO 73:2009 Gestión de Riesgos - Vocabulario, el Art. 7° del Reglamento de Cierre de Minas, la Guía para la Elaboración de Planes de Cierre de Minas y donde se describen los términos clave.

- **Acción de mantenimiento:** Tarea de mantenimiento, secuencia de actividades elementales de mantenimiento realizadas con un propósito determinado. Ejemplos de acciones de mantenimiento son el diagnóstico, la localización, la revisión verificación o combinaciones de éstas (IEC 60300-3-11, 3.1.14).
- **Actitud de riesgo:** Enfoque de la organización para evaluar y llevar a cabo finalmente conservar, adoptar o alejarse de riesgo (Guía ISO 73:2009, 3.7.1.1).
- **Análisis de riesgos:** Proceso de comprender la naturaleza del riesgo y para determinar el nivel de riesgo. El análisis de riesgos constituye la base para la evaluación de riesgo y las decisiones sobre el tratamiento del riesgo. El análisis de riesgos incluye estimación del riesgo (Guía ISO 73:2009, 3.6.1).
- **Apetito por el riesgo:** Cantidad y tipo de riesgo que una organización está preparada para ejercer, mantener o adoptar (Guía ISO 73:2009, 3.7.1.2).
- **Aversión al riesgo:** Actitud de dar la espalda a riesgo (Guía ISO 73:2009, 3.7.1.4).
- **Capacidad de Respuesta (CR):** Analiza la capacidad de respuesta ante la ocurrencia del evento. Para evaluar tal capacidad, se toma como referencia la existencia o no de un sistema de alerta temprana y el nivel de información, capacitación y entrenamiento de la población con potencial de ser alcanzada por el evento (SERNAGEOMIN/Arcadis 2014).
- **Cierre de Minas:** El cierre de minas puede definirse como el conjunto de actividades a ser implementadas a lo largo del ciclo de vida de la mina a fin de cumplir con los criterios ambientales específicos y alcanzar los objetivos sociales deseados después de la etapa de minado. El cierre de minas es un proceso progresivo que empieza en la primera etapa del proyecto con el diseño conceptual y termina sólo cuando se han alcanzado de manera permanente los objetivos específicos de cierre (MINEM 2006).

- **Concepto de mantenimiento.** Relación entre los escalones de mantenimiento, los niveles jerárquicos y los niveles de mantenimiento que se van a aplicar para el mantenimiento de un elemento (IEC 60300-3-11, 3.1.16).
- **Condición de cuidado activo:** Esta condición requiere de programas de cuidado y mantenimiento post-cierre a largo plazo del componente minero. El caso típico de cuidado activo es cuando existe una necesidad de tratamiento continuo de efluentes para cumplir con los objetivos ambientales. El cuidado activo frecuentemente requiere de la presencia de personal permanente en el sitio (MINEM 2006).
- **Condición de cuidado pasivo:** Ocurre cuando existe una mínima necesidad de programas de cuidado y mantenimiento continuo en la etapa post-cierre del componente minero. El nivel de esfuerzo requerido para el cuidado y mantenimiento puede variar ampliamente. El trabajo puede incluir programas de monitoreo permanente, inspección anual de las instalaciones de almacenamiento de residuos y mantenimiento de vegetación, pero en general no se requiere personal permanente en el sitio (MINEM 2006).
- **Condición de ningún cuidado:** Cuando no se requieren actividades de cuidado o mantenimiento adicionales después del término de las actividades de cierre del componente minero. Casi nunca se presenta este caso para la totalidad de una operación minera (MINEM 2006).
- **Consecuencia:** Resultado de un evento que afectan a los objetivos. Un evento puede dar lugar a una serie de consecuencias. Una consecuencia puede ser cierto o incierto y puede tener efectos positivos o negativos sobre los objetivos. Las consecuencias pueden ser cualitativa o cuantitativa. Las primeras consecuencias pueden escalar a través de efectos en cadena (Guía ISO 73:2009, 3.6.1.3).
- **Contexto operativo.** Circunstancias en las que se espera que un elemento opere (IEC 60300-3-11, 3.1.20).
- **Control:** Medida que puede modificar el riesgo. Los controles incluyen cualquier proceso, la política, dispositivo, práctica u otras acciones que modifican el riesgo. Los controles no siempre pueden ejercer previsto, o supone modificar efecto (Guía ISO 73:2009, 3.8.1.1).
- **Criterios de riesgo:** Términos de referencia respecto al cual el significado de un riesgo se evalúa. Los criterios de riesgo se basan en objetivos de la organización,

y externos y el marco interior de. Criterios de riesgo se pueden derivar de las normas, leyes, políticas y otros requisitos (Guía ISO 73:2009, 3.3.1.3).

- **Criticidad:** Severidad del efecto de una desviación de la función especificada de un elemento con respecto a los criterios de evaluación especificados. La magnitud considerada de los efectos puede limitarse al propio elemento, al sistema del que forma parte o extenderse más allá de los límites del sistema. La desviación puede ser una avería, un fallo, una degradación, un exceso de temperatura, un exceso de presión, etc. En algunas aplicaciones, la evaluación de la criticidad puede incluir otros factores tales como la probabilidad de ocurrencia de la desviación o la probabilidad de detección (IEC 60300-3-11, 3.1.2).
- **Daño a la salud (DS):** Refleja la potencial afectación a la salud de las personas. La gradualidad de la severidad de la consecuencia ante esta variable, tiene relación con la temporalidad del malestar/daño, así como también con la necesidad de contar con asistencia médica para la recuperación (SERNAGEOMIN/Arcadis 2014).
- **Duración (DU):** Indica el tiempo que permanecerá la consecuencia desde su aparición. No considera la aplicación de acciones correctivas. La variable duración busca determinar la extensión “temporal” del riesgo analizado (SERNAGEOMIN/Arcadis 2014).
- **Efecto de un fallo:** Consecuencia de un modo de fallo en la operación, la función o el estado del elemento (IEC 60300-3-11, 3.1.5).
- **Elemento:** Parte, componente, dispositivo, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema que puede considerarse individualmente. Un elemento puede estar constituido por hardware, software o por ambos y, en casos particulares, incluir personas. Los elementos de un sistema pueden ser naturales u objetos materiales fabricados por el hombre, así como modos de pensar y los resultados de ellos (por ejemplo, formas de organización, métodos matemáticos o lenguajes de programación). Un grupo de elementos, por ejemplo una población de elementos o una muestra, puede considerarse en sí mismo como un elemento. Un elemento software puede ser un código fuente, un código objeto, un código de control de tarea, un dato de control o una colección de ellos (IEC 60300-3-11, 3.1.15).
- **Escalón de mantenimiento.** Posición en una organización en la que se encuentran determinados niveles de mantenimiento que se van a aplicar sobre un

elemento. Ejemplos de escalones de mantenimiento son: explotación, taller de reparación y fabricante. El escalón de mantenimiento se caracteriza por el nivel de experiencia del personal, los medios disponibles, la localización, etc. (IEC 60300-3-11, 3.1.17)

- **Evaluación de los riesgos:** Proceso de comparación de los resultados de análisis de riesgo con criterios de riesgo para determinar si el riesgo y/o su magnitud es aceptable o tolerable evaluación de riesgos. Ayuda en la decisión sobre el tratamiento del riesgo (Guía ISO 73:2009, 3.7.1).
- **Evaluación del efecto del envejecimiento:** Evaluación sistemática de un elemento para determinar la frecuencia óptima de aplicación de una tarea de mantenimiento mediante el análisis de la información recogida de la experiencia de su explotación. NOTA. Se evalúa la resistencia del elemento a un proceso de deterioro con respecto a su envejecimiento o uso (IEC 60300-3-11, 3.1.1).
- **Evento:** Aparición o cambio de un conjunto particular de circunstancias. Un evento puede ser una o más ocurrencias, y puede tener varias causas. Un evento puede consistir en algo que no está sucediendo. Un evento puede ser a veces conocido como un "incidente" o "accidente". Un evento sin consecuencias también puede ser referido como un "Near Miss", "incidente", "cayó cerca" o "los pelos" (Guía ISO 73:2009, 3.5.1.2).
- **Extensión (EX):** Define la magnitud y/o consecuencia espacial del evento. Esta variable tiene como objetivo determinar la superficie y/o extensión territorial que podría ser afectada por el riesgo analizado (SERNAGEOMIN/Arcadis 2014).
- **Fallo (de un elemento):** Pérdida de la capacidad de un elemento para funcionar como se requiere (IEC 60300-3-11, 3.1.4).
- **Fallo funcional:** Reducción del funcionamiento por debajo del nivel deseado (IEC 60300-3-11, 3.1.10).
- **Fallo potencial.** Condición identificable que indica que un fallo funcional está próximo a que ocurra o está ocurriendo (IEC 60300-3-11, 3.1.21).
- **Fragilidad (FR):** Considera la fragilidad de las personas ante la ocurrencia del evento en relación a su composición etaria, es decir, el porcentaje de la población en edades frágiles, como son los niños y ancianos. Dicha población se considera podría tener menor capacidad de enfrentar eventos indeseados que exijan

movilidad física autónoma y rápida para evitar sufrir consecuencias físicas (SERNAGEOMIN/Arcadis 2014).

- **Fuente de riesgos:** Elemento que por sí solo o en combinación tiene el potencial intrínseco para dar lugar a riesgo. Una fuente de riesgos puede ser tangible o intangible (Guía ISO 73:2009, 3.5.1.1)
- **Función:** Propósito perseguido de un elemento según se describe en la correspondiente norma de funcionamiento requerida (IEC 60300-3-11, 3.1.7).
- **Gestión de riesgos:** Actividades coordinadas para dirigir y controlar una organización con respecto al riesgo (Guía ISO 73:2009, 2.1).
- **Identificación de riesgos:** Proceso de encontrar, reconocer y describir los riesgos. La identificación de riesgos puede incluir los datos históricos, análisis teórico, y opiniones de expertos, y las partes interesadas de necesidades (Guía ISO 73:2009, 3.5.1).
- **Inspección:** Identificación y evaluación de la condición real con respecto a una especificación (IEC 60300-3-11, 3.1.13).
- **Intensidad en la comunidad (INC):** Indica el grado de afectación en áreas de uso antrópico, incluyendo cualquier sector utilizado por un grupo humano con diversos fines. En consecuencia, se debe evaluar el grado de afectación de sectores utilizados con fines residenciales, económicos (puede incluir infraestructura o sectores con clara intervención como áreas cultivadas, así como también áreas de pastoreo de animales), ceremoniales o recreativos (SERNAGEOMIN/Arcadis 2014).
- **Intensidad en el Ambiente (INA):** Expresa el grado de alteración sobre el medio ambiente que pueda generar el riesgo analizado. Son ejemplos de intensidad alta la destrucción y/o pérdida del recurso o componente analizado; de intensidad media la disminución y/o degradación del componente; en tanto, se entenderá como intensidad baja cuando el nivel y/o grado de alteración implique modificaciones menores en la condición de la situación basal del componente (SERNAGEOMIN/Arcadis 2014).
- **Intervalo fallo potencial – fallo funcional (P-F):** Intervalo entre el instante en el que un fallo potencial se hace detectable y el instante hasta que ocurre el fallo funcional (IEC 60300-3-11, 3.1.22).

- **La política de gestión de riesgos:** Declaración de las intenciones y dirección generales de una organización relacionada con la gestión del riesgo (Guía ISO 73:2009, 2.1.2).
- **Mantenimiento centrado en la confiabilidad.** Método para identificar y seleccionar las políticas de gestión de fallos orientadas a lograr de forma eficaz y eficiente los niveles requeridos de seguridad, disponibilidad y coste operativo (IEC 60300-3-11, 3.1.23).
- **Modo de fallo:** Manera en la que ocurre un fallo. Un modo de fallo puede definirse mediante la pérdida de la función o la transición del estado en que ocurrió (IEC 60300-3-11, 3.1.8).
- **Modo de fallo oculto:** Modo de fallo cuyos efectos no llegan a ser apreciados por el operador en circunstancias normales (IEC 60300-3-11, 3.1.11).
- **Nivel de riesgo:** Magnitud de un riesgo, expresada en términos de la combinación de las consecuencias y sus probabilidad (Guía ISO 73:2009, 3.6.1.8).
- **Nivel jerárquico:** Nivel de subdivisión de un elemento desde el punto de vista de una acción de mantenimiento. Ejemplos de niveles jerárquicos podrían ser un subsistema, un circuito impreso, un componente. El nivel jerárquico depende de la complejidad de la construcción del elemento, la accesibilidad a los subelementos, el nivel de experiencia del personal de mantenimiento, el equipamiento disponible para pruebas, las consideraciones de seguridad, etc. (IEC 60300-3-11, 3.1.12).
- **Perfil de riesgo:** Descripción de un conjunto de riesgos. El conjunto de los riesgos pueden incluir aquellas que se refieren a toda la organización, parte de la organización, o como definido de otra forma (Guía ISO 73:2009, 3.8.2.5).
- **Plan de cierre de minas:** Es un instrumento de gestión ambiental que comprende todas las acciones técnicas y legales requeridas para garantizar el logro de los objetivos de cierre de la mina. El planeamiento del cierre de minas es una actividad permanente que comienza durante los estudios de pre-factibilidad, es parte del estudio de impacto ambiental (EIA), de la etapa de ingeniería de detalle, y continúa a lo largo del ciclo de vida de la mina hasta la etapa post-cierre (MINEM, 2005, art. 7º numeral 12).
- **Plan de gestión de riesgos:** Régimen en el marco de gestión del riesgo especificando el enfoque, la gestión componentes y los recursos que se aplicarán a

la gestión del riesgo. Los componentes de gestión caracterizada por incluir procedimientos, prácticas, la asignación de responsabilidades, la secuencia y el calendario de actividades. El plan de gestión de riesgos se puede aplicar a un determinado producto, proceso y proyecto, y una parte o la totalidad de la organización (Guía ISO 73:2009, 2.1.3).

- **Política de gestión de fallos:** Actividades de mantenimiento, cambios operativos, modificaciones de diseño u otras acciones que tienen el fin de mitigar las consecuencias de los fallos (IEC 60300-3-11, 3.1.6).
- **Política de mantenimiento.** Enfoque general para la realización del mantenimiento y el soporte al mismo basado en los objetivos y políticas de los propietarios, usuarios y consumidores (IEC 60300-3-11, 3.1.18).
- **Programa de mantenimiento.** Lista de todas las tareas de mantenimiento desarrolladas para un sistema bajo un contexto operativo y de mantenimiento dados (IEC 60300-3-11, 3.1.19).
- **Probabilidad:** Probabilidad de que algo suceda. En la terminología de la gestión del riesgo, la palabra "riesgo" se utiliza para referirse a la posibilidad de que algo suceda, tanto si están incluidos, medidos o determinarse de manera objetiva o subjetivamente, cualitativa o cuantitativamente, y describió el uso términos generales o matemáticamente (por ejemplo, una probabilidad o una frecuencia más de un período determinado). El término inglés "riesgo" no tiene un equivalente directo en algunas lenguas, sino el equivalente del término "probabilidad" se utiliza a menudo. Sin embargo, en inglés, "probabilidad" está frecuentemente interpretado como un término matemático. Por lo tanto, en la terminología de gestión de riesgos, "riesgo" se utiliza con la intención de que deben tener la misma amplia interpretación del término "probabilidad" tiene en muchos idiomas distintos al inglés (Guía ISO 73:2009, 3.6.1.1).
- **Proceso de gestión de riesgos:** Aplicación sistemática de políticas de gestión, procedimientos y prácticas para las actividades de comunicación, consultoría, establecer el contexto y la identificación, análisis, evaluación, tratamiento, seguimiento y revisión de riesgo (Guía ISO 73:2009, 3.1)
- **Proximidad (PR):** Evalúa la proximidad de la instalación minera a asentamientos humanos o áreas con actividades antrópicas. Es necesario considerar que dependiendo del alcance espacial de un evento no deseado, la proximidad de las

obras ante asentamientos humanos o áreas con usos antrópicos cobra relevancia para evaluar la severidad de las consecuencias (SERNAGEOMIN/Arcadis 2014).

- **Recuperabilidad (REC):** Define la posibilidad de volver al estado normal de forma total o parcial de las personas y sus actividades después de ocurrido el evento. Esta variable busca identificar cómo el evento no deseado puede comportarse en el tiempo en función de que el daño sea revertido (SERNAGEOMIN/Arcadis 2014).
- **Relevancia en el ambiente (RA):** Refleja la relevancia y/o valor ambiental del componente. A modo de referencia, son ejemplos de relevancia ambiental muy alta la presencia de bofedales; paisaje prístino y/o escasamente intervenido; suelos con alto potencial agropecuario; hábitats de flora/fauna frágiles y/o que contengan especies en algún tipo de categoría de conservación; recursos hídricos – superficiales y/o subterráneos- que sean utilizados para el consumo humano y/o tengan valor biológico por su importancia para el ecosistema (SERNAGEOMIN/Arcadis 2014).
- **Revisión:** Actividad que se realice para determinar la conveniencia, adecuación y eficacia de la materia para lograr objetivos establecidos. Examen se puede aplicar a un marco de gestión de riesgo, el proceso de gestión del riesgo, el riesgo o control (Guía ISO 73:2009, 3.8.2.2).
- **Reversibilidad (REV):** Evalúa la capacidad que tiene el medio ambiente de revertir naturalmente o mediante acciones las consecuencias del riesgo. Esta variable tiene como objetivo principal determinar la capacidad de resiliencia del componente ambiental según el tipo de riesgo analizado. En este sentido, busca evaluar si es que la componente ambiental podrá volver a la situación o condición existente de manera previa a la generación del riesgo analizado (SERNAGEOMIN/Arcadis 2010).
- **Riesgo:** Definido como el efecto de la incertidumbre sobre los objetivos. Un efecto es una desviación de lo esperado, positivos y/o en contra. Los objetivos pueden presentarse bajo distintas formas (como servicios financieros, salud y seguridad, y las metas ambientales) y puede se aplican a niveles diferentes (como proyecto estratégico, en toda la organización, productos y procesos). Riesgo a menudo se caracterizan por hacer referencia a los eventos potenciales y consecuencias, o una combinación de éstos. El riesgo se expresa a menudo en

términos de una combinación de las consecuencias de un evento (incluyendo los cambios en circunstancias) y la probabilidad asociada de ocurrencia. La incertidumbre es el Estado, aunque sea parcial, de la deficiencia de la información relacionada con la comprensión o el conocimiento de un caso, su consecuencia, o la probabilidad (Guía ISO 73:2009, 1.1).

- **Riesgo propio:** Persona o entidad con la responsabilidad y la autoridad para gestionar el riesgo (Guía ISO 73:2009, 3.5.1.4).
- **Riesgo residual:** De riesgo restante después del tratamiento del riesgo. Riesgo residual puede contener riesgos no identificados. El riesgo residual también puede ser conocido como "riesgo que subsisten" (Guía ISO 73:2009, 3.8.1.6).
- **Seguimiento:** Control continuo, la supervisión, observación o crítica para determinar el carácter con el fin de identificar el cambio del nivel de rendimiento requerido o esperado. El seguimiento se puede aplicar a un marco de gestión de riesgo, el proceso de gestión del riesgo, el riesgo o control (Guía ISO 73:2009, 3.8.2.1).
- **Sistema.** Conjunto de elementos que interactúan o interrelacionados entre si (IEC 60300-3-11, 3.1.25). En el contexto de la confiabilidad, un sistema tendrá: a) un propósito definido expresado en términos de funciones requeridas; b) unas condiciones establecidas de operación/uso; c) unos límites definidos. La estructura de un sistema puede ser jerárquica (IEC 60300-3-11, 3.1.25).
- **Tarea de búsqueda de fallos:** Inspección programada o prueba específica utilizada para determinar si ha ocurrido un determinado fallo oculto ha ocurrido (IEC 60300-3-11, 3.1.9).
- **Tolerante al daño:** Capaz de soportar el daño y de continuar funcionando como se requiere, posiblemente con una carga o capacidad reducidas (IEC 60300-3-11, 3.1.3).
- **Tratamiento del riesgo:** Proceso para modificar el riesgo. Tratamiento de los riesgos puede implicar: evitar el riesgo al decidir no iniciar o continuar con la actividad que dio lugar al riesgo; tomando o el incremento del riesgo con el fin de perseguir una oportunidad; la eliminación de la fuente de riesgo; cambiar la probabilidad; cambiando las consecuencias; la distribución del riesgo a otra parte o las partes (incluidos los contratos y la financiación de riesgo), y mantener el riesgo en la elección informada. Tratamientos de riesgos que tienen que ver con

consecuencias negativas se refieren a veces como "reducción del riesgo," el riesgo "La eliminación", de prevención de riesgos "y" reducción del riesgo". El tratamiento de los riesgos puede crear nuevos riesgos o modificar los riesgos existentes (Guía ISO 73:2009, 3.8.1).

- **Valoración de riesgos:** Proceso general de identificación de riesgo, análisis de riesgo y de evaluación de riesgos (Guía ISO 73:2009, 3.4.1).
- **Vida segura.** Edad antes de la que no se espera que ocurran fallos (IEC 60300-3-11, 3.1.24).
- **Vida útil.** Intervalo de tiempo hasta un instante dado en el que se ha alcanzado un estado determinado. Un estado determinado puede ser una función de intensidad de fallo, un requisito de soporte del mantenimiento, una condición física, edad, obsolescencia, etc. El intervalo de tiempo puede empezar en el momento del primer uso, en un instante posterior, es decir, la vida útil remanente (IEC 60300-3-11, 3.1.26).

### **ANEXO 3: DESASTRES MINEROS EN EL MUNDO 1941 - 2015**

#### Explosiones

- 1941: El 21 de abril 18 mineros fallecieron y otros 19 resultaron heridos a causa de una explosión de grisú en Barruelo de Santullán (cuenca minera palentina), España;
- 1942: El 26 de abril fallecieron 1.549 mineros en Honkeiko (China) por explosión;
- 1975: Accidente minero de 1975 en Fígols por explosión minera;
- 1995: El 1 de septiembre se produjo una explosión de grisú en la Mina de San Nicolás en Ablaña, Mieres (Asturias) en el que murieron 14 mineros;
- 2000: 28 de septiembre de 2000.- Más de 160 trabajadores fallecen como consecuencia de una explosión por gas grisú en una mina de carbón de Muchonggou, en la provincia china de Guizhou.
- 2006: El 19 de febrero se produjo una explosión en Coahuila (México) en el llamado Desastre minero de Pasta de Conchos.
- 2007: El 19 de marzo se produjo una explosión en una mina cerca de la ciudad de Novokuznetsk, en el óblast de Kemerovo, Rusia, en la que murieron 108 trabajadores;
- 2007: Ucrania 18-11-2007, explosión en mina de carbón, 90 muertos.
- 2008: El 2 de febrero fallecen 9 mineros en una explosión en la rica provincial carbonífera de Shaanxi;
- 2009: 21 de noviembre de 2009.- Una explosión en la mina Xinxing, situada en la localidad china de Hegang, deja 108 muertos.
- 2010: El 16 de junio mueren en explosión 73 personas en una mina de Amagá, municipio del departamento de Antioquia, Colombia (situada 36 kilómetros de Medellín) posiblemente por la acumulación de gases;
- 2010: 19 de noviembre quedaron atrapados 29 mineros a más de 1500m bajo tierra después de una explosión de metano (principal componente del conocido gas grisú) en el accidente minero de Pike River en la mina de Atarau, Isla Sur. 12 Días más tarde otra nueva explosión hizo que se desvaneciera toda esperanza de encontrarles con vida;
- 2011: Pakistán 20-03-2011, explosión de mina de carbón, 52 muertos

- 2014: Turquía - Soma 13-05-2014, explosión e incendio de varios días en mina de carbón y 301 muertos;

#### Gaseado

- 1945: El 19 de junio, se produjo la Tragedia del humo en la mina de cobre El Teniente, Chile. Hubo 355 muertos;
- 2007: El 3 de octubre varios cientos de mineros se quedaron atrapados cuando un conducto de aire se rompió en la mina Elandsrand cerca de Carletonville (Sudáfrica);

#### Inundación en mina subterránea

- 1963: El 24 de octubre se produjo una invasión de agua en la mina de Lengede (Alemania). 29 mineros fallecieron, 11 mineros estaban atrapados en la mina hasta que pudieron ser rescatados 14 días después, en el llamado Milagro de Lengede;
- 1998: 12 de abril de 1998. Al menos un centenar de mineros mueren al inundarse las galerías subterráneas en las que trabajaban en el norte de Tanzania.
- 2007: El 18 de agosto se produce unas lluvias torrenciales en la región de Xingtai (China) en la que 181 mineros quedaron sepultados;

#### Colapso de presa de relaves

- 1998: España - Aznalcóllar 25 de abril 1998. Colapso de presa de relaves en mina Los Frailes, vertido de 6,5 Mm<sup>3</sup> de aguas acidas al río Agrio, cubrió miles de hectáreas de tierras de cultivo y amenaza al parque nacional Doñana.
- 2014: Canada 04-08-2014, colapso de depósito de relaves de Monte Polley, vertido de 14,5 Mm<sup>3</sup> de agua acida al lago Polley.
- 2015: Estados Unidos 07-08-2015, colapso de depósito de desechos de Cemento Creek, vertido de 1.1 Mm<sup>3</sup> aguas acidas a río Animas. EPA asume responsabilidad.
- 2015: Brasil – Minas Gerais 05-11-2015, colapso de depósito de relave de minera Samarco, 62 Mm<sup>3</sup> de residuos mineros vertidos al río Doce, pueblo sepultado y 17 muertos.

#### Derrumbe en mina subterránea

- 2000: 5 de abril de 2000.- Unas 150 personas mueren en un derrumbe ocurrido en una mina de diamantes de la región de Kono, en el este de Sierra Leona.
- 2001: El 21 de agosto, 47 mineros fueron atrapados en la mina Zasyadko en Ucrania;

- 2002: El 24 de julio, 9 mineros fueron atrapados en la mina Quecreek, Pennsylvania;
- 2006: El 20 de enero se produjo un accidente en la mina de Atacama, con un saldo de 2 muertos y 70 personas atrapadas;
- 2007: El 14 de octubre 24 personas murieron por derrumbe en la mina Suárez en Cauca (Colombia);
- 2010: 19 de marzo de 2010.- Al menos 200 personas mueren como consecuencia de un derrumbe ocurrido en una mina de oro en Sierra Leona.
- 2010: El 5 de agosto quedaron atrapados 33 mineros en un accidente en el yacimiento San José cercano a Copiapó en Chile. Hasta el día 22 de agosto no se supo si estaban con vida o no, luego de que un mensaje asegurara que sí. El derrumbe se produjo a más de 700 metros de profundidad.

#### Derrumbe en mina de tajo abierto

- 2012: Congo 13-08-2012, derrumbe de talud, 60 muertos
- 2013: Tibet 29-03-2013, derrumbe de talud, 83 muertos

#### ANEXO 4: CRITERIOS DE FACTORES TÉCNICOS DE MODO DE FALLO POR COMPONENTE

**Tabla 23: Categorías de criterios técnicos en colapso de pilares y puentes de roca en mina subterránea (FT<sub>1</sub>)**

<b>Criterio</b>	<b>0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>0,75</b>	<b>1</b>
<b>a<sub>1</sub></b> : Factor de seguridad de pilares remanentes (FS)	FS > 1,4	1,3 < FS < 1,4	1,2 < FS < 1,3	1,1 < FS < 1,2	FS = 1
<b>b<sub>1</sub></b> : Altura explotada (h) / Altura sobrecarga (H)	h < H/3	-	-	-	h > H/3
<b>c<sub>1</sub></b> : Volumen vacío dejado posterior a la explotación (V <sub>o</sub> )	V <sub>o</sub> < área basal x H/3	-	-	-	V <sub>o</sub> ≥ área basal x H/3
<b>d<sub>1</sub></b> : Efecto "pistón" por colapso de cámaras o puentes de roca	No existen eventos registrados	1 evento en la vida útil de la mina	1 evento cada 10 años	1 evento cada 5	1 evento al año

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 24: Categorías de criterios técnicos en sobrecarga estructural por sismo en mina subterránea (FT<sub>2</sub>)**

<b>Criterio</b>	<b>0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>0,75</b>	<b>1</b>
<b>a<sub>2</sub></b> : Desplome de la pared del cráter con ángulo menor al ángulo de diseño.	Ningún evento registrado	1 vez en la vida útil de la mina	1 vez cada 10 años	1 vez cada 5 años	1 vez al año
<b>b<sub>2</sub></b> : Abandono de galerías o sectores productivos producto de aparición de grietas por efecto de subsidencia	Ningún evento registrado	1 vez en la vida útil de la mina	1 vez cada 10 años	1 vez cada 5 años	1 vez al año
<b>c<sub>2</sub></b> : Registro de sismo con aceleración mayor al máximo probable según estudio de riesgo sísmico realizado para el diseño	Ningún evento registrado	-	-	-	Se registra

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 25: Categorías de criterios técnicos en acidificación de agua en mina subterránea (FT<sub>3</sub>)**

Criterio	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>3</sub></b> : Calidad de agua de mina	pH > 6 ó SO <sub>4</sub> <250 mg/lit ó metales disueltos < 0,5 mg/lit	pH [6 ; 5> ó SO <sub>4</sub> [250;500mg/lit> ó metales disueltos 0,5 - 1 mg/lit	pH [5 ; 4,5> ó SO <sub>4</sub> [500;1000mg/lit> ó metales disueltos 1,1 - 5 mg/lit	pH [4,5 ; 3,5] ó SO <sub>4</sub> [1000;2000mg/lit] ó metales disueltos 5,1 - 20 mg/lit	pH <3,5 ó SO <sub>4</sub> >2000 mg/lit ó metales disueltos > 20 mg/lit
	El criterio <b>a<sub>3</sub></b> supone la existencia de un programa de muestreo y monitoreo de la calidad del agua mina. Este programa debe ser sistemático y cubrir diferentes sectores de la mina en diferentes periodos. Es fundamental considerar la posible existencia de variaciones estacionales ligadas a un aumento de caudales relacionado por ejemplo con periodo de deshielo. Estos aumentos de caudales pueden estar acompañados de cambio de concentraciones de iones disueltos.				
<b>b<sub>3</sub></b> : Presencia de unidades potenciales generadoras de ácido en la zona de subsidencia	PNN > 20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM	-	PNN [20 ; -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM>	-	PNN < -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM
	Respecto al criterio <b>b<sub>3</sub></b> , no siempre existe un programa de caracterización sistemática de las unidades geológicas y de su potencial generación de drenaje ácido. En caso de no existencia de este programa y a menos que existen otras evidencias geológicas que permiten descartar el riesgo de generación de drenaje ácido, el factor será valorizado en su peor condición (valor 1). El potencial de drenaje ácido se determina aplicando diferentes tipos de pruebas estándares. En este caso, puede ser el test ABA, el test NAG o pruebas cinéticas en celdas de humedad.				

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 26: Categorías de criterios técnicos en falla de talud por sismo en tajo abierto (FT<sub>4</sub>)**

<b>Criterio</b>	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>4</sub></b> : Registro de Sismo con aceleración mayor al máximo probable	Ningún evento registrado	-	-	-	Se registra
<b>b<sub>4</sub></b> : Reconocimiento de cambios litológicos, nuevas discontinuidades de gran longitud, o cambios de calidad de macizo rocoso	Ningún evento registrado	1 evento en período de evaluación	Entre 2 y 3 eventos en período de evaluación	Entre 4 y 5 eventos en período de evaluación	Más de 5 eventos en período de evaluación
<b>c<sub>4</sub></b> : Grandes deslizamientos	Ningún evento registrado	1 evento en período de evaluación	Entre 2 y 3 eventos en período de evaluación	Entre 4 y 5 eventos en período de evaluación	Más de 5 eventos en período de evaluación
<b>d<sub>4</sub></b> : Aparición de grietas más allá del límite de seguridad originalmente establecido	Ningún evento registrado	1 evento en período de evaluación	Entre 2 y 3 eventos en período de evaluación	Entre 4 y 5 eventos en período de evaluación	Más de 5 eventos en período de evaluación

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 27: Categorías de criterios técnicos en infiltración de DAR de mina (FT<sub>5</sub>)**

<b>Criterio</b>	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>5</sub></b> : Presencia en las paredes del rajo de unidades geológicas con potencial generadora de DAR <b>b<sub>5</sub></b> : Existencia del Nivel Freático por encima del piso del rajo	Ninguna unidad	1 - 5% unidad en la roca	6 - 15% unidad en la roca	16 - 20% unidad en la roca	>20% unidad en la roca
	No existe	-	-	-	Si existe
En referencia al criterio <b>b<sub>5</sub></b> , no siempre existe un programa de caracterización sistemática de las unidades geológicas y de su potencial generación de drenaje ácido. En caso de no existir este programa y a menos que existan otras evidencias geológicas que permiten descartar el riesgo de generación de drenaje ácido, el factor será valorizado en su peor condición (valor 1). En este caso, la evaluación se refiere al diseño final del rajo tal como está diseñado al momento de presentar el plan de cierre. El potencial de drenaje ácido se determina aplicando diferentes tipos de pruebas estándares. En este caso, puede ser el test ABA, el test NAG o pruebas cinéticas en celdas de humedad.					
<b>c<sub>5</sub></b> : Evidencia de afloramiento de agua en las paredes del rajo	Ningún evento registrado	Afloramiento puntual	Afloramiento ocasional	Afloramiento estacional	Afloramiento permanente
<b>d<sub>5</sub></b> : Acumulación de agua en el rajo; formación de una laguna	Ningún evento registrado	Acumulación puntual	Acumulación ocasional	Acumulación estacional	Acumulación permanente
<b>e<sub>5</sub></b> : Aumento de la concentración de sulfatos en drenaje o laguna	Ningún aumento registrado	Leve aumento (500 mg/L < [SO <sub>4</sub> ] < 1000 mg/L)	1000 mg/L < [SO <sub>4</sub> ] < 2000 mg/L	2000 mg/L < [SO <sub>4</sub> ] < 3000 mg/L.	Aumento sostenido ([SO <sub>4</sub> ] > 3000 mg/L)
<b>f<sub>5</sub></b> : Disminución de pH en drenaje o laguna	Ninguna disminución registrada	5 < pH < 5,5	Leve disminución registrada (4,0 < pH <= 5,0)	Leve disminución registrada (4,0 < pH <= 5,0)	Disminución sostenida (pH <= 3,0)

“... continuación”

<b>Criterio</b>	<b>0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>0,75</b>	<b>1</b>
<b>gs:</b> Aumento de la concentración de metales disueltos en drenaje o laguna	Ningún aumento registrado	Leve aumento: concentración > 0,3 x norma	Concentración > 0,5 x norma	Concentración > 0,8 x norma	Concentración > valor total de la norma

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 28: Categorías de criterios técnicos en liberación de relaves por sismo en depósito con dique de arena (FT<sub>6.0</sub>) y de material de préstamo (FT<sub>6.1</sub>)**

<b>Criterio</b>	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>6</sub></b> : Valor mínimo medido inferior al valor de diseño (cota coronamiento - cota relave contacto con el muro)	Ningún evento registrado	Registro continuo. Desviaciones frecuentes (>4 por año)	Registro continuo. Desviaciones muy frecuentes (>4 por año)	Registro esporádico. Desviaciones extensivas (>4 por año)	Registro solamente esporádico con desviaciones. Desviaciones constantes por más de un año. No existe control o monitoreo.
<b>b<sub>6</sub></b> : Valor mínimo medido inferior al valor de diseño de revancha Total (cota coronamiento - cota nivel de aguas claras)	Ningún evento registrado	Registro continuo. Desviaciones frecuentes (>4 por año)	Registro continuo. Desviaciones muy frecuentes (>4 por año)	Registro esporádico. Desviaciones extensivas (>4 por año)	Desviaciones constantes por más de un año. Registro solamente esporádico con desviaciones. No existe control o monitoreo
<b>c<sub>6</sub></b> : Contenidos de finos en arena del muro del tranque sea >20% (bajo #200)-	Ningún evento registrado	Registro continuo. Desviaciones frecuentes (>4 por año)	Registro continuo. Desviaciones muy frecuentes (>4 por año)	Registro esporádico. Desviaciones extensivas (>4 por año)	Desviaciones constantes por más de un año. Registro solamente esporádico con desviaciones. No existe control o monitoreo.

“... continuación”

Criterio	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>d<sub>6</sub></b> : Niveles piezométricos en el muro: valores de registros altos sistemáticos en el tiempo (ubicación distribuida arealmente)	Cumple con niveles máximo permitidos. Distribución areal adecuada	Registro continuo. Desviaciones frecuentes (>4 por año y concentradas en un sector)	Registro continuo. Desviaciones muy frecuentes (>4 por año y afectan todo el muro)	Registro esporádico. Desviaciones extensivas (>4 por año y afectan todo el muro). Distribución areal adecuada	Desviaciones constantes por más de un año y afectan a todo el muro y registro solamente esporádico con desviaciones. No existe control o monitoreo. O no existe una adecuada ubicación de los puntos de monitoreo
<b>e<sub>6</sub></b> : Densidad relativa de compactación del material del muro menor al diseño	Ningún evento registrado	Registro continuo. Desviaciones frecuentes (>4 por año y concentradas en un sector)	Registro continuo. Desviaciones muy frecuentes (>4 por año y afectan todo el muro)	Registro esporádico. Desviaciones extensivas (>4 por año y afectan todo el muro)	Desviaciones constantes por más de un año y afectan a todo el muro y registro solamente esporádico con desviaciones. No existe control o monitoreo.
<b>f<sub>6</sub></b> : Ángulo del talud de aguas abajo mayor al talud de diseño	Ningún evento registrado	Registro continuo. Desviaciones frecuentes (>4 por año)	Registro continuo. Desviaciones muy frecuentes (>4 por año)	Registro esporádico. Desviaciones extensivas (>4 por año)	Desviaciones constantes por más de un año. Registro solamente esporádico con desviaciones. No existe control o monitoreo

“... continuación”

<b>Criterio</b>	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>g<sub>6</sub></b> : Laguna fuera de su posición de diseño (considerar solo en caso de muro de arena)	Ningún evento registrado en los últimos 5 años.	-	-	-	Evento registrado en los últimos 5 años.
<b>h<sub>6</sub></b> : Afloramientos de agua en el pie del muro no recogidos por el dren, Agua del dren enturbiada	Ningún evento registrado por año	-	-	-	Más de un evento por año en el período de análisis y dos o más eventos en año consecutivos
<b>i<sub>6</sub></b> : Valor mínimo medido del ancho de coronamiento de diseño inferior al requerido	Ningún evento registrado	Registro continuo. Desviaciones frecuentes (>4 por año y concentradas en un sector)	Registro continuo. Desviaciones muy frecuentes (>4 por año y afectan todo el muro)	Registro esporádico. Desviaciones extensivas (>4 por año y afectan todo el muro)	Desviaciones constantes por más de un año y afectan a todo el muro y registro solamente esporádico con desviaciones. No existe control o monitoreo

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 29: Categorías de criterios técnicos en liberación de relaves por erosión interna por piping del depósito (FT<sub>7</sub>)**

<b>Criterio</b>	<b>0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>0,75</b>	<b>1</b>
<b>a<sub>7</sub></b> : Laguna de aguas cercana al muro	Ningún evento registrado	-	-	-	Evento registrado
<b>b<sub>7</sub></b> : Existencia de ductos que atraviesen el muro del tranque	No existe	-	-	-	Existe
<b>c<sub>7</sub></b> : Niveles piezométricos en el muro: valores de registro altos sistemáticos en el tiempo y que su ubicación sea distribuida de forma areal	Ningún evento registrado	Desviaciones frecuentes (>4 por año y concentradas en un sector). Distribución areal adecuada	Desviaciones muy frecuentes (>4 por año y afectan todo el muro). Distribución areal adecuada	Registro esporádico Desviaciones extensivas (>4 por año y afectan todo el muro). Distribución areal adecuada	Desviaciones constantes por más de un año y afectan a todo el muro. Registro solamente esporádico con desviaciones. No existe control o monitoreo. Ubicación inadecuada los puntos de monitoreo
<b>d<sub>7</sub></b> : Afloramientos de agua en el pie del muro no recogidos por el dren, agua del dren enturbiada	Ningún evento registrado	-	-	-	Evento registrado

“... continuación”

<b>Criterio</b>	<b>0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>0,75</b>	<b>1</b>
<b>e<sub>7</sub></b> : Contenidos de finos en arena del muro del tranque sea >20% (bajo #200)	Ningún evento registrado	Desviaciones frecuentes (>4 por año)	Desviaciones muy frecuentes (>4 por año).	Registro esporádico Desviaciones extensivas (>4 por año).	Desviaciones constantes por más de un año y afectan a todo el muro y registro solamente esporádico con desviaciones. No existe control o monitoreo
<b>f<sub>7</sub></b> : Densidad relativa de compactación del material del muro menor al diseño	Ningún evento registrado.	Desviaciones frecuentes (>4 por año y concentradas en un sector).	Desviaciones muy frecuentes (>4 por año y afectan todo el muro)	Registro esporádico Desviaciones extensivas (>4 por año y afectan todo el muro).	Desviaciones constantes por más de un año y afectan a todo el muro y Registro solamente esporádico con desviaciones. No existe control o monitoreo.

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 30: Categorías de criterios técnicos en overtopping por lluvia intensa y/o crecida en depósito de relaves con dique con geomembrana (FT<sub>8,0</sub>) y sin geomembrana (FT<sub>8,1</sub>)**

<b>Criterio</b>	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>8</sub></b> : Valor mínimo medido inferior al valor de diseño (cota coronamiento - cota espejo de agua)	Ningún evento registrado	Desviaciones frecuentes (>4 por año)	Desviaciones muy frecuentes (>4 por año)	Registro esporádico Desviaciones extensivas (>4 por año)	Desviaciones constantes por más de un año y afectan a todo el muro y Registro solamente esporádico con desviaciones. No existe control o monitoreo
<b>b<sub>8</sub></b> : Laguna de aguas en contacto con el muro (solo en caso de que el muro no tenga geomembrana)	Ningún evento registrado	-	-	-	Evento registrado
<b>c<sub>8</sub></b> : Condición operativa del vertedero de crecidas diseñado para el Cierre (cuando existe)	Esta operativo	-	-	-	No está operativo
<b>d<sub>8</sub></b> : Laguna de aguas en contacto con el muro (*solo en caso de que el muro tenga geomembrana)	Ningún evento registrado	-	Evento registrado	-	-

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 31: Categorías de criterios técnicos en overtopping por remoción de masa en depósito de relaves con dique con geomembrana (FT<sub>9,0</sub>) y sin geomembrana (FT<sub>9,1</sub>)**

<b>Criterio</b>	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>9</sub></b> : Movimientos de remoción en masa en la cubeta	Ningún evento registrado	-	No activos (estables)	-	Activos (inestables)
<b>b<sub>9</sub></b> : Valor mínimo medido inferior al valor de diseño (cota coronamiento - cota espejo de agua)	Ningún evento registrado	Desviaciones frecuentes (>4 por año)	Desviaciones muy frecuentes (>4 por año)	Registro esporádico Desviaciones extensivas (>4 por año)	Desviaciones constantes por más de un año y afectan a todo el muro y Registro solamente esporádico con desviaciones. No existe control o monitoreo
<b>c<sub>9</sub></b> : Laguna de aguas en contacto con el muro (solo en caso de que el muro este sin geomembrana (liner))	Ningún evento registrado	-	-	-	Evento registrado
<b>d<sub>9</sub></b> : Registro del volumen de agua del depósito	Volumen adecuado según plan de llenado del depósito (fijado en el diseño)	-	-	-	Volumen no adecuado
<b>e<sub>9</sub></b> : Laguna de aguas cercana al muro	Ningún evento registrado	-	-	-	Evento registrado

“... continuación”

<b>Criterio</b>	<b>0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>0,75</b>	<b>1</b>
<b>f<sub>9</sub></b> : Laguna de aguas en contacto con el muro (* solo en caso de que el muro tenga geomembrana (liner))	Ningún evento registrado	-	Evento registrado	-	-

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 32: Categorías de criterios técnicos en contaminación de aguas subterráneas por infiltración de DAR desde depósito de relaves con dique de arena (FT<sub>10.0</sub>), de material de préstamo (FT<sub>10.1</sub>) y con relaves en pasta (FT<sub>10.2</sub>)**

Criterio	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>10</sub></b> : Características de los relaves	PNN > 20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM	-	PNN [20 ; -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM>	-	PNN < -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM
	En lo referido al criterio <b>a<sub>10</sub></b> No siempre existe un programa de caracterización sistemática de los relaves y de su potencial generación de drenaje ácido. En caso de no existir este programa y a menos que existen otras evidencias geológicas o datos de la planta que permiten descartar el riesgo de generación de drenaje ácido, el factor será valorizado en su peor condición (valor 1). En este caso, la evaluación se refiere tanto a las arenas como a las lamas. El potencial de drenaje ácido se determina aplicando diferentes tipos de pruebas estándares. En este caso, el criterio de basa en los resultados del test ABA.				
<b>b<sub>10</sub></b> : Balance hidrológico proyectado para el cierre	Modelo de balance hidrológico demuestra la inexistencia del drenaje	-	El modelo indica baja probabilidad de drenaje	-	El modelo indica la existencia de drenaje
	En lo referido al modelo hidrológico <b>b<sub>10</sub></b> se refiere principalmente a las condiciones de cierre, después del cese de la operación del tranque y en ausencia de un sistema de bombeo y recirculación del agua de relave. Deberían existir modelos separados para el muro y la cubeta. Además, en forma adicional el modelo debería considerar las condiciones intermediarias que se producen después del cese de la descarga de relave y hasta que se alcance un régimen estacionario.				

“... continuación”

criterio	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>c<sub>10</sub></b> : Oxidación de sulfuros en las arenas del muro	No se observa ningún índice de oxidación de las arenas en el muro del tranque (manchas rojizas; hidróxidos y óxidos de hierro; sulfatos)	-	Solo se observa muy localmente algunos índices de oxidación de las arenas en el muro del tranque (manchas rojizas; hidróxidos y óxidos de hierro; sulfatos)	-	Se observan claros índices de oxidación de las arenas en el muro del tranque (manchas rojizas; hidróxidos y óxidos de hierro; sulfatos)
<b>d<sub>10</sub></b> : Oxidación de las lamas en la cubeta	No se observa ningún índice de oxidación de las lamas en la cubeta del tranque (avance de un frente de oxidación con presencia de hidróxidos y óxidos de hierro)	-	Se observa algunos índices de oxidación de las lamas en la cubeta del tranque (avance muy lento de un frente de oxidación con presencia de hidróxidos y óxidos de hierro)	-	Se observan claros índices de oxidación de las lamas en la cubeta del tranque (avance rápido del frente de oxidación con presencia de hidróxidos y óxidos de hierro)
<b>e<sub>10</sub></b> : Evidencia de infiltraciones durante la operación	No se observan ninguna señal indicando la existencia de infiltraciones desde el tranque (aumento de conductividad, concentración de sulfatos y/o de metales disueltos en pozos de control)	-	No se observan algunos índices sobre la posible existencia de infiltraciones desde el tranque (aumento de conductividad, concentración de sulfatos y/o de metales disueltos en pozos de control)	-	No se observan claros índices de la existencia de infiltraciones desde el tranque (aumento de conductividad, concentración de sulfatos y/o de metales disueltos en pozos de control)

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 33: Categorías de criterios técnicos en contaminación atmosférica por erosión eólica en el depósito de relaves (FT<sub>11</sub>)**

<b>Criterio</b>	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>11</sub></b> : Existencia de partículas erosionables	No existe	-	-	-	Existe
<b>b<sub>11</sub></b> : Porcentaje de humedad superficial	Saturado 100%	-	-	-	Seco 0%

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 34: Categorías de criterios técnicos en falla de talud por sismo en depósito de rípios de lixiviación (FT<sub>12</sub>)**

<b>Criterio</b>	<b>0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>0,75</b>	<b>1</b>
<b>a<sub>12</sub></b> : Identificación de ángulos de taludes	Según diseño de ingeniería o menor	-	Desviaciones ocasionales	-	Sin monitoreo o con un ángulo superior al de diseño
<b>b<sub>12</sub></b> : Identificación del grado saturación de colocación del material	De acuerdo a diseño o con menor valor	-	Ocasionalmente	-	En forma sistemática
<b>c<sub>12</sub></b> : Diseño de bermas	Bermas de acuerdo a diseño de ingeniería o mayor	-	Bermas ocasionalmente menor al diseño de ingeniería	-	Construcción sistemática de bermas menores a lo indicado en el diseño o bien, sin monitoreo
<b>d<sub>12</sub></b> : Determinación del nivel freático piezómetros en la base de la pila	De acuerdo a diseño o con menor valor	Desviaciones ocasionales 1-2 por año	Registro esporádico sin desviaciones	Desviaciones constantes por más de un año	Desviaciones constantes en todo el período y no existe control o monitoreo
<b>e<sub>12</sub></b> : Identificación de presencia de grietas, asentamiento, desplazamiento o deslizamiento en base de pila	Ningún evento registrado	Eventos ocasionales sin deslizamiento	Eventos ocasionales con deslizamiento de material (1 capa)	Eventos que involucran más de una capa y con deslizamientos	Deslizamiento de material que requiere reparación

“... continuación”

<b>Criterio</b>	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>f<sub>12</sub></b> : Identificación de falla en el sistema de drenaje durante operación (indicador de posible vulnerabilidad en el cierre).	Ningún evento registrado	Evento puntual, 1 vez al año.	Eventos ocasionales, mayores a 1 vez por año.	Desviaciones frecuentes durante el año que además requieren reparación.	Desviaciones sistemáticas en todo el período que requieren reparación o bien, no existe control o monitoreo geotécnico.
<b>g<sub>12</sub></b> : Especificación de las características del material de diseño en zona de bordes o prisma resistente.	Materiales utilizados de acuerdo a diseño o más competentes (Bajo contenido de finos)	-	Desviaciones ocasionales	-	Desviaciones sistemáticas. Todo el talud resistente construido con materiales poco competente
<b>h<sub>12</sub></b> : Control de inclusión de hielo en el prisma resistente en el caso de botadero de rípios.	Ningún evento registrado.	-	Ocasionalmente y sin presencia de nieve atrapada.	-	En forma sistemática con hielo atrapado en el interior.

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 35: Categorías de criterios técnicos en falla de talud por erosión hídrica en depósito de rípios de lixiviación (FT<sub>13</sub>)**

<b>Criterio</b>	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>13</sub></b> : Registro de precipitaciones que excedan el criterio de diseño de los canales perimetrales.	Registros de acuerdo a diseño	-	-	-	Evento registrado
<b>b<sub>13</sub></b> : Identificación de registros de precipitaciones que excedan el valor crítico (aplicado en taludes y bermas de seguridad).	Registros de acuerdo a diseño o menor.	-	-	-	Evento registrado

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 36: Categorías de criterios técnicos en contaminación de agua subterránea por infiltración de DAR en pilas estáticas de rípios de lixiviación (FT<sub>14</sub>)**

<b>Criterio</b>	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>14</sub></b> : Falla en la carpeta (pila permanente y botadero con carpeta basal).	Ninguna fuga detectada.	-	Fugas puntuales y menores.	-	Fugas importantes y extendidas.
<b>b<sub>14</sub></b> : Infiltraciones durante la operación.	Ningún evento registrado.	-	Posible existencia de infiltraciones por registros de contaminantes en pozos agua abajo.	-	Existencia de infiltraciones por registros de contaminantes en pozos agua abajo.
<b>c<sub>14</sub></b> : Falla en el muro cortafuga durante operación.	Ningún evento registrado.	Eventos ocasionales, 1 por año.	Eventos mayores a 1 por año.	Eventos por más de un año que requieran reparación.	Desviaciones constantes en todo el período que requieren reparación, o no existe control o monitoreo geotécnico.
<b>d<sub>14</sub></b> : Pérdida de solución en la operación de las pilas estáticas	No se observa.	-	Se observan pérdidas < 5% en un periodo de 2 años.	-	Se observan pérdidas > 5% en un periodo de 2 años.
<b>e<sub>14</sub></b> : Balance hidrológico proyectado para el cierre	Modelo de balance hidrológico demuestra la inexistencia del drenaje	-	El modelo indica baja probabilidad de drenaje	-	El modelo indica la existencia de drenaje

“... continuación”

<b>Criterio</b>	<b>0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>0,75</b>	<b>1</b>
<b>f<sub>14</sub></b> : Características de los rípios.	PNN > 20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM	-	PNN [20 ; -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM>	-	PNN < -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 37: Categorías de criterios técnicos en contaminación de agua subterránea por infiltración de DAR en botaderos de rípios de lixiviación (FT<sub>15</sub>)**

<b>Criterio</b>	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>15</sub></b> : Drenajes por apilamiento de los rípios (estruje).	No se han observado ningún drenaje durante la operación del botadero.	-	Se ha observado drenajes ocasionales.	-	Se observan drenajes sistemáticos al momento de descargar los rípios en el botadero.
<b>b<sub>15</sub></b> : Infiltraciones durante la operación detectadas en el monitoreo aguas abajo de la instalación	Ningún evento registrado.	-	Posible existencia de infiltraciones por registros de contaminantes en pozos agua abajo.	-	Existencia de infiltraciones por registros de contaminantes en pozos agua abajo.
<b>c<sub>15</sub></b> : Balance hidrológico proyectado para el cierre	Modelo de balance hidrológico demuestra la inexistencia del drenaje.	-	El modelo indica baja probabilidad de drenaje.	-	El modelo indica la existencia de drenaje.
<b>d<sub>15</sub></b> : Características de los rípios	PNN > 20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM	-	PNN [20 ; -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM>	-	PNN < -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 38: Categorías de criterios técnicos en contaminación de agua superficial por inundación/crecida en depósitos de rípios de lixiviación (FT<sub>16</sub>)**

Criterio	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>16</sub></b> : Existencia y sobre carga en capacidad de piscina de emergencia.	Ningún evento registrado o bien, no existencia.	-	-	-	Evento registrado o no monitoreo.

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 39: Categorías de criterios técnicos en contaminación atmosférica por erosión eólica en depósitos de rípios de lixiviación (FT<sub>17</sub>)**

Criterio	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>17</sub></b> : Excedencia de material particulado	Ningún evento registrado	<20% de las mediciones exceden las Normas vigentes en 2 años.	20-30% de las mediciones exceden las Normas vigentes en 2 años.	31-50% no cumple en 2 años.	>50% no cumple en 2 años o sin monitoreo.

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 40: Categorías de criterios técnicos en contaminación de agua subterránea por lluvias en depósitos de estériles (FT<sub>18</sub>)**

<b>Criterio</b>	<b>0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>0,75</b>	<b>1</b>
<b>a<sub>18</sub></b> : Resultado pruebas de generación de Drenaje Acido en Roca (DAR) para el material almacenado	PNN > 20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM	-	PNN [20 ; -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM>	-	PNN < -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM
<b>b<sub>18</sub></b> : Evidencia de DAR en drenajes en la base del botadero	Ninguna evidencia de DAR, pH neutro, sulfatos inferiores a 200 ppm metales bajo 0,5 mg/L.	-	-	-	Evidencias de DAR en drenajes del botadero, pH <4 ó sulfatos que superan 200 ppm ó metales sobrepasen 0,5 mg/L.
<b>c<sub>18</sub></b> : Aparición de drenajes en el botadero (en la base)	Inexistentes.	Esporádicos.	Ocasionales	Estacionales.	Permanentes.
<b>d<sub>18</sub></b> : Existencia del registro de valores anómalos de concentración de sustancias contaminantes en pozos de observación aguas abajo del botadero	No se registran	1 vez en la vida útil de la mina	1 vez cada 10 años	1 vez cada 5 años	1 vez al año

“... continuación”

Criterio	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>e<sub>18</sub></b> : Se observa aparición de agua en base del botadero durante períodos de lluvia intensa	Ningún evento registrado	1 vez en la vida útil de la mina	1 vez cada 10 años.	1 vez cada 5 años	1 vez al año
<b>f<sub>18</sub></b> : Fallas en modelamiento hidrogeológico del botadero y en las medidas de mitigación proyectadas. Calibración con menor cantidad de pozos que los actualmente en existencia	Observaciones de terreno son concordantes con las del modelo hidrogeológico. Operan las medidas de mitigación	-	Se observan desviaciones respecto a modelamiento hidrogeológico predictivo	-	Existen amplias desviaciones respecto al comportamiento del modelo, las medidas de mitigación son inefectivas. No existe modelo hidrogeológico. No existen registros de monitoreo

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 41: Categorías de criterios técnicos en contaminación de agua subterránea por una crecida en depósitos de estériles (FT<sub>19</sub>)**

<b>Criterio</b>	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>19</sub></b> : Resultado pruebas de generación de Drenaje Acido en Roca (DAR) para el material almacenado	PNN > 20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM	-	PNN [20 ; -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM>	-	PNN < -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM
<b>b<sub>19</sub></b> : Evidencia de DAR en drenajes del botadero	Ninguna evidencia de DAR, pH neutro, sulfatos inferiores a 200 ppm metales bajo 0,5 mg/L	-	-	-	Evidencias de DAR en drenajes del botadero, pH <4 ó sulfatos que superan 200 ppm ó metales sobrepasen 0,5 mg/L
<b>c<sub>19</sub></b> : Sistema de saneamiento proyectado con valor de la crecida máxima probable (CMP)	Sistema proyectado/verificado con la CMP	-	-	-	Sistema de saneamiento no ha sido proyectado o verificado con valor de crecida máxima probable CMP
<b>d<sub>19</sub></b> : Registro de valores alterados en pozos de observación aguas abajo del botadero.	Ningún evento registrado	1 vez en la vida útil de la mina	1 vez cada 10 años	1 vez cada 5 años	1 vez al año

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 42: Categorías de criterios técnicos en contaminación atmosférica por erosión eólica en depósitos de estériles (FT<sub>20</sub>)**

<b>Criterio</b>	<b>0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>0,75</b>	<b>1</b>
<b>a<sub>20</sub></b> : Caracterización del material particulado que forma parte de la capa superior del botadero en términos de contenido de material bajo #200 (72um).	Contenido de material <#200 despreciable	-	-	-	Existe material <#200 en capas superficial del botadero. Alta probabilidad de erosión y suspensión eólica.

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 43: Categorías de criterios técnicos en contaminación de agua superficial por lluvia intensa en depósitos de estériles (FT<sub>21</sub>)**

<b>Criterio</b>	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>21</sub></b> : Evidencia de DAR en drenajes del botadero	Ninguna evidencia de DAR, pH neutro, sulfatos inferiores a 200 ppm metales bajo 0,5 mg/L.	-	-	-	Evidencias de DAR en drenajes del botadero, pH <4 ó sulfatos que superan 200 ppm ó metales sobrepasen 0,5 mg/L.
<b>b<sub>21</sub></b> : Resultado pruebas de generación de DAR para el material almacenado	PNN > 20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM	-	PNN [20 ; -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM>	-	PNN < -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM
<b>c<sub>21</sub></b> : Sistema de saneamiento proyectado/verificado con valor de la crecida máxima probable (CMP)	Sistema proyectado/verificado con la CMP.	-	-	-	Sistema de saneamiento no ha sido proyectado o verificado con valor de crecida máxima probable CMP.
<b>d<sub>21</sub></b> : Rebose de depósito de retención de aguas contactadas, si existe	Ningún evento registrado.	1 vez en la vida útil de la mina	1 vez cada 10 años	1 vez cada 5 años	1 vez al año
<b>e<sub>21</sub></b> : Aparición de drenajes en el botadero	Inexistentes	Esporádicos	Ocasionales	Estacionales.	Permanentes.

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 44: Categorías de criterios técnicos en contaminación de agua superficial por crecida en depósitos de estériles (FT<sub>22</sub>)**

<b>Criterio</b>	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>22</sub></b> : Resultado pruebas de generación de Drenaje Acido en Roca (DAR) para el material almacenado	PNN > 20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM	-	PNN [20 ; -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM>	-	PNN < -20 Kg de CaCO <sub>3</sub> /TM
<b>b<sub>22</sub></b> : Evidencia de DAR en drenajes del botadero.	Ninguna evidencia de DAR, pH neutro, sulfatos inferiores a 200 ppm metales bajo 0,5 mg/L.	-	-	-	Evidencias de DAR en drenajes del botadero, pH <4 ó sulfatos que superan 200 ppm ó metales sobrepasen 0,5 mg/L.
<b>c<sub>22</sub></b> : Sistema de saneamiento proyectado/verificado con valor de la crecida máxima probable (CMP)	Sistema proyectado/verificado con la CMP.	-	-	-	Sistema de saneamiento no ha sido proyectado o verificado con valor de crecida máxima probable CMP.
<b>d<sub>22</sub></b> : Aparición de drenajes en el botadero	Inexistentes.	Esporádicos	Ocasionales	Estacionales	Permanentes

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 45: Categorías de criterios técnicos en erosión hídrica por lluvia o deshielo diferido intenso en depósitos de estériles (FT<sub>23</sub>)**

Criterio	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>23</sub></b> : Diseño de saneamiento superficial del botadero.	Contempla velocidades de flujo compatibles con materiales de revestimiento, contempla áreas de rebose.				Contempla velocidades de flujo que requieren revestimiento (hormigón u otro), no existen áreas de inundación. Se prevé requerimientos de mantención post evento.
<b>b<sub>23</sub></b> : Sistema de saneamiento de las aguas lluvias o cursos de agua, ubicados aguas arriba del botadero.	No registra excedencias, overtopping ni erosión. Cuenta con revanchas y velocidad de escurrimiento de diseño no genera erosión.	No registra excedencias, overtopping ni erosión	No hay desborde pero existen sedimentos que bloquean parcialmente el curso de alguno de los canales de contorno.	Desborde localizado de canales de contorno. Arrastre de sedimentos bloquea localmente el curso de estos canales	Los canales se desbordan hay evidencia de erosión y mal pronóstico futuro para el sistema

“... continuación”

Criterio	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>c<sub>23</sub></b> : Empozamientos en plataformas, con descargas concentradas (canalizadas) y formación de cárcavas en taludes exteriores.	Ningún evento registrado. Hay diseño y bajadas encauzadas de aguas lluvia.	1 vez en la vida útil de la mina	1 vez cada 10 años. Aparición de bajadas no controladas con fuerte erosión.	1 vez cada 5 años	1 o más veces al año. No existe proyecto de saneamiento de plataforma y taludes. Sub-estimación de precipitaciones de diseño y acumulación de aguas en plataforma
<b>d<sub>23</sub></b> : Infiltración de precipitaciones en agrietamientos existentes, iniciando o acelerando deslizamiento	Ningún evento registrado, no hay o son mantenidos anualmente o post evento	Se observan agrietamientos menores, aberturas milimétricas, aislados, de corrida o longitud reducida. Son mantenidos periódicamente. Se observan agrietamientos medios, aberturas centimétricas, una o dos líneas paralelas al coronamiento, de corridas de varios metros, con penetraciones inferiores a 0,5 m. Mantenición	Se observan agrietamientos intensos, aberturas decimétricas, corridas de metros a decenas de metros, uno a tres agrietamientos (cubren 0,05H de ancho), penetraciones de 1m a 2 m. Poca a nula mantención (varios años sin mantención).	Evento registrado reiteradamente. Hay agrietamientos de más de 0,4 m de abertura, corridas de varias decenas de metros, varios agrietamientos paralelos (cubren más de 0,2 H de ancho) con penetraciones de más de 4m de profundidad y con evidencias de asentamientos de coronamientos superiores a 1 m. Sin mantención.	

“... continuación”

<b>Criterio</b>	<b>0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>0,75</b>	<b>1</b>
<b>e<sub>23</sub></b> : Erosión superficial de taludes.	Ningún evento registrado	1 vez en la vida útil de la mina.	1 vez cada 10 años. Colocación de materiales de baja permeabilidad y reducida granulometría.	1 vez cada 5 años.	1 vez al año. No existe control del material de cobertura (de granulometría reducida y/o baja permeabilidad). Sub-evaluación de las precipitaciones de diseño.
<b>f<sub>23</sub></b> : Evidencia de flujo de agua concentrado sobre los taludes. Pie de taludes exhiben flujos de barro, producto de arrastre hídrico.	Ningún evento registrado.	1 vez en la vida útil de la mina.	1 vez cada 10 años.	1 vez cada 5 años.	1 vez al año.

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 46: Categorías de criterios técnicos en deslizamiento por sismo en depósitos de estériles (FT<sub>24</sub>)**

criterio	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>24</sub></b> : Aparición de materiales poco competentes en la fundación, no considerados en proyecto	Ninguna aparición registrada	Extensión de material poco competente menor a 0.3H (H: Altura del depósito)	Extensión de material poco competente entre 0.3H y 0.7H	Extensión de material poco competente mayor a 0.7H, pendientes moderadas (15° a 25°), nivel freático cercano al de diseño	No existe reconocimiento geotécnico del suelo de fundación. Extensión de material poco competente comparable con la altura. Zonas de pendientes fuertes (>25°). Nivel freático en el suelo de fundación supera al de diseño y escorrentías generalizadas.
<b>b<sub>24</sub></b> : Dispersión de materiales poco competentes (con contenido de finos y de humedad superior al de proyecto) en zona de bordes o prisma resistente	No existen materiales poco competentes, o si existen hay un claro procedimiento para su disposición y se respeta.	Extensión de material poco competente menor a 0.3H	Extensión de material poco competente entre 0.3H y 0.7H, y al menos un punto no controlado de depositación de material poco competente	Extensión de material poco competente mayor a 0.7H. Al menos un punto no controlado de depositación de material poco competente	Extensión de material poco competente comparable con la altura. No se controla material depositado. No se controla ubicación de materiales poco competentes. Contenido de finos mayor a 25%.

“... continuación”

<b>Criterio</b>	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>c<sub>24</sub></b> : Inclusión de nieve/ hielo en el prisma resistente	Ningún evento registrado	Espesores de nieve < 10 cm	Espesores de nieve entre 10 cm y 30 cm	Espesores de nieve entre 30 cm y 50 cm	Espesores de nieve > 50 cm
<b>d<sub>24</sub></b> : Registro de sismo mayor al sismo considerado en el diseño	Ningún evento registrado	-	-	-	Evento registrado
<b>e<sub>24</sub></b> : Registro de agrietamientos, asentamientos, desplazamiento o deslizamientos	Ningún evento registrado	Presencia de agrietamientos al borde del talud	Presencia de agrietamientos y/o asentamientos al borde del talud	Presencia de inestabilidades locales (a nivel de banco)	Inestabilidad comprometiendo 2 o más bancos
<b>f<sub>24</sub></b> : Nivel freático superior al valor de diseño	Ningún evento registrado	Desviaciones ocasionales 1/2 por año	Registro esporádico sin desviaciones	Desviaciones constantes por más de un año	Desviaciones constantes en todo el período y no existe control o monitoreo
<b>g<sub>24</sub></b> : Incumplimiento de altura máxima de diseño de capa	Cumple con la altura máxima de capa	-	Aumento espesor de capa menor a un 10% el espesor de diseño.	-	Aumento espesor de capa sobre un 10% el espesor de diseño
<b>h<sub>24</sub></b> : Falla en el sistema de drenaje	Ningún evento registrado	Eventos ocasionales 1 por año	Eventos mayores a 1 por año.	Desviaciones constantes por más de un año	Desviaciones constantes en todo el período y no existe control o monitoreo

“... continuación”

<b>Criterio</b>	<b>0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>0,75</b>	<b>1</b>
<b>i<sub>24</sub></b> : Colocación de material con grado de saturación superior a la de diseño	Cumple con la colocación de material acorde al diseño	Extensión de material poco competente menor a 0.3H.	Saturación del material 10 <%S <40. Extensión de material poco competente entre 0.3H y 0.7H.	Saturación del material 40 <%S <85. Extensión de material poco competente mayor a 0.7H.	% S > 85%. Extensión de material en todas las capas y en aglomeraciones a nivel de sello de fundación
<b>j<sub>24</sub></b> : Identificación de bermas (más angostas) y taludes (más empinados) que las consideradas en el diseño	Cumple con lo considerado en el diseño	-	Reducción de ancho de bermas en un 3% en toda la altura.	-	Reducción de ancho de bermas en un 10% en toda la altura.

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014

**Tabla 47: Categorías de criterios técnicos en lixiviación natural por lluvias en depósitos de escorias (FT<sub>25</sub>)**

Criticidad	0	0,25	0,5	0,75	1
<b>a<sub>25</sub></b> : Contenido de metales en las escoria	Las escorias presentan bajas concentraciones de As y/o Sb (inferiores a 0,05%).	-	Las escorias presentan concentraciones de As y/o Sb entre 0,05% y 0,5%.	-	Las escorias presentan altas concentraciones de As y/o Sb (> 0,5%).
<b>b<sub>25</sub></b> : Condiciones de enfriamiento	Las escorias fueran enfriadas muy rápidamente (enfriamiento con agua) y presentan una estructura vidriosa muy homogénea.	-	-	-	Las escorias fueran enfriadas muy lentamente (enfriamiento natural) y presentan una estructura cristalina poco homogénea

Fuente: SERNAGEOMIN/Arcadis 2014