UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA
ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS

MEJORAMIENTO DE LA GESTIÓN DE UNA PRESA DE RELAVES PARA DISMINUIR LOS RIESGOS AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD

Tesis presentada por el Bachiller:
ARIAS QUISPE, CESAR FABIAN

Para optar el Grado Académico de:
Maestro en Ciencias de la Tierra, con mención en Geotecnia

Asesor:
M.Sc. HUAMANI HUAYHUA, LIZARDO GUILLERMO

AREQUIPA – PERÚ
2021

DEDICATORIA

A mi hija y esposa que son el motivo de mi vida.

A mis padres, a mis hermanos y a mis sobrinos quienes me brindan todo su apoyo en bien de mi profesión.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi asesor M.Sc. Lizardo Huamaní Huayhua por su dedicación en la revisión y aportes de este trabajo, gracias a los cuales pude concluir la presente tesis.

RESUMEN

Las empresas mineras que benefician su mineral por métodos de concentración producen relaves que son depositados utilizando presas, en el Perú la Autoridad Nacional del Agua (ANA) presentó en el 2015 el estudio del inventario de presas del Perú, donde se han inventariado 743 presas, según la clasificación por el uso, 113 presas están destinadas a la minería/relaves.

Si las empresas mineras que usan presas de relave no gestionan su riesgo seguiremos presenciando contaminación ambiental en el país, entonces ¿Es necesario desarrollar un modelo de gestión de presas de depósito de relave que recrecen por el método línea central, para reducir el nivel de riesgo hasta que éste sea aceptable, de forma que se eviten impactos ambientales negativos?

El modelo de gestión para presas de depósitos de relaves mejorado en esta tesis trata cuestiones que son específicas a emplazamientos de una manera práctica, con intención de mejorar continuamente el desempeño de la industria minera, ayudando a los titulares de la actividad minera a utilizar las mejores prácticas de ingeniería y conforme a la legislación aplicable que incluyan criterios medioambientales y de seguridad; desde la selección y el diseño del emplazamiento, a través de la construcción y operación, hasta el cierre definitivo.

El modelo de gestión implementado en una presa en operación demostró cumplir sus objetivos, reflejando una tendencia a reducir la cantidad de incidentes de seguridad y de medio ambiente; el modelo de gestión para la gestión de presas de relaves puede ser mejorado continuamente porque está adecuado al ciclo de Edwards Deming (planificar, hacer, verificar y actuar).

Palabras claves: relaves, presa, riesgo, impacto ambiental, recrecimiento, método línea central, modelo de gestión.

ABSTRACT

Mining companies that benefit their ore concentration methods produce tailings that are deposited using dams in Peru's National Water Authority (ANA) presented in the 2015 study inventory of dams in Peru, which have been inventoried 743 dams as classified by use, 113 dams are intended to mining / tailings.

If mining companies using tailings dams do not manage your risk will continue to see environmental contamination in the country, then Is it necessary to develop a model of management of tailings dams built by the method central line, to reduce the level of risk until it acceptable, so that adverse environmental impacts are avoided?

The management model for tailings dams improved in this thesis deals with issues that are specific to locations in a practical way, with intent to continuously improve the performance of the mining industry, helping mining operators to use the best engineering practices and under applicable law including environmental and safety criteria, from the selection and design of the site, through construction and operation to closure.

The management model implemented on a dam in operation demonstrated meet its objectives, reflecting a tendency to reduce the number of security incidents and environment; the management model for the management of tailings dams can be continuously improved that is suitable Edwards Deming cycle (plan, do, check and act).

Keywords: tailings, dam, risk, environmental impact, regrowth, central line method, management model.

ABREVIATURAS

ANA	Autoridad Nacional del Agua
ARD	Drenaje Acido de Relaves
BowTie	Metodología de árbol de fallos y sucesos indicadores
COER	Centro de Operaciones de Emergencia Regional
DEVIANDES	Desarrollo Vial de los Andes
DGM	Dirección General de Minería
EPA	Agencia de Protección Ambiental
ICMM	Consejo Internacional de Minería y Metales
ICOLD	Comisión Internacional de Grandes Presas
IGN	Instituto Geográfico Nacional
INDECI	Instituto Nacional de Defensa Civil
MINEM	Ministerio de Energía y Minas de Perú
OEFA	Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
OSINERGMIN	Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería
PBI	Producto Bruto Interno
SARCC	Search and Rescue Coordination Center
UNEP	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
UTM	Universal Transversal de Mercator
WGS	Sistema Geodésico Mundial
WRAC	Work Risk Assessment and Control Evaluación y control de riesgos laborales

ÍNDICE

Dedicatoria i

Agradecimiento ii

Resumen iii

Abstract iv

Abreviaturas v

Índice vi

Capítulo I 1

Introducción 1

1.1. Planteamiento del problema 2

1.1.1. Fundamentación del problema 3

1.1.2. Formulación del problema 6

1.1.3. Delimitación 6

1.1.3.1. Delimitación espacial 6

1.1.3.2. Delimitación temporal 6

1.1.3.3. Delimitación social 6

1.1.4. Objetivos de la investigación 6

1.1.4.1. Objetivo general 6

1.1.4.2. Objetivos específicos 6

1.1.5. Justificación e importancia del proyecto 6

1.1.5.1. Conveniencia 6

1.1.5.2. Relevancia social 7

1.1.5.3. Implicancia practica 7

1.1.5.4. Utilidad metodológica 7

1.1.5.5. Viabilidad de la investigación 7

1.1.6. Alcances y limitaciones de la investigación 7

1.2. Hipótesis 7

1.2.1. Planteamiento de la hipótesis de investigación 7

1.2.1.1. Hipótesis general 7

1.2.1.2. Hipótesis específica....7
1.3. Identificación y clasificación de las variables....8
1.3.1. Variable dependiente....8
1.3.2. Variable independiente....8
1.4. Metodología de la investigación....8
1.4.1. Método de investigación....8
1.4.2. Tipo y nivel de investigación....8
1.4.3. Diseño de investigación....8
1.4.4. Población y muestra....8
Capítulo II....9
Marco Teórico....9
2.1. Antecedentes de estudio....9
2.2. Características de los relaves....9
2.2.1. Tipos de residuos mineros....9
2.2.2. Propiedades físicas y estructurales....10
2.2.3. Características químicas....11
2.3 Tipos de crecimiento de presas....15
2.3.1. Tipo aguas arriba....16
2.3.2. Tipo aguas abajo....17
2.3.3. Tipo línea central....18
2.4. Monitoreo y mantenimiento de depósitos de desechos....18
2.4.1. Medición de la presión de poros....25
2.4.2. Presión dinámica de poros y licuefacción....26
2.4.3. Movimientos verticales....26
2.4.4. Movimientos horizontales....27
2.4.5. Deposición de relaves....27
2.4.6. Recuperación de depósitos....29
2.5. Cierre de depósitos de desechos....32

2.6. Estabilidad de la presa de relaves.....33
2.7. Contaminación Ambiental.....34
Capítulo III 36
Metodología 36
3.1. Alcances.....36
3.2. Procedimiento 38
3.2.1. Definir las fuentes de riesgo.....38
3.2.2. Definir sucesos o eventos top 39
3.2.3. Identificar amenazas 40
3.2.4. Identificar medidas de control 41
3.2.5. Identificar consecuencias.....41
3.2.6. Identificar las medidas de recuperación.....42
Capítulo IV 46
Mejora del modelo de gestión 46
4.1. Ubicación.....46
4.1.1. Ubicación política 46
4.1.2. Ubicación en coordenadas UTM 47
4.1.3. Ubicación en coordenadas geográficas 47
4.1.4. Ubicación en la carta nacional (IGN).....47
4.1.5. Accesibilidad 47
4.2. Modelo de gestión de las instalaciones de relaves 49
4.2.1. Funciones y responsabilidades 52
4.2.1.1. Competencia y capacitación 53
4.2.1.2. Gestión del cambio 53
4.2.2. Descripción de la instalación.....54
4.2.2.1. Perspectiva general de la instalación.....54

4.2.2.2. Condiciones del emplazamiento 55
4.2.2.3. Componentes típicos de una instalación 56
4.2.2.4. Requisitos reglamentarios 58
4.2.2.5. Historial de la construcción 61
4.2.2.6. Control de documentos 62
4.2.3. Operación 64
4.2.3.1. Transporte y deposición de relaves 65
4.2.3.2. Levantamiento de presas y cuencas 66
4.2.3.3. Gestión de recursos hídricos 67
4.2.3.4. Protección medioambiental 68
4.2.3.5. Seguridad y protección 69
4.2.3.6. Documentación 69
4.2.4. Mantenimiento 70
4.2.4.1. Parámetros de mantenimiento 73
4.2.4.2. Mantenimiento de rutina y predictivo 73
4.2.4.3. Documentación 74
4.2.5. Vigilancia 75
4.2.5.1. Parámetros de vigilancia 78
4.2.5.2. Procedimientos de vigilancia 79
4.2.5.3. Control visual 80
4.2.5.4. Medición de instrumentos 81
4.2.5.5. Compaginación y análisis de datos 82
4.2.5.6. Inspección y análisis periódicos 83
4.2.5.7. Documentación 83
4.2.6. Planificación y reacción en caso de emergencia 84

Capítulo V 117

Discusión y resultados 117

5.1. Presa de relaves Chinchan 117

5.2. Análisis de rotura de presa 118

5.2.1. Aplicación de la metodología de árbol de fallos y sucesos indicadores (BowTie) para el riesgo catastrófico por falla de presa 120

5.3. Clasificación por consecuencias de la falla 126

5.4. Estadísticas de incidentes 129

5.5. Planes de respuesta de acción desencadenante 130

Conclusiones 132

Recomendaciones 134

Bibliografía 135

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Depósito de relaves..... 10
Figura 2.2 Construcción del muro con arenas de relave 16
Figura 2.3 Crecimiento aguas arriba 16
Figura 2.4 Crecimiento aguas abajo..... 17
Figura 2.5 Crecimiento línea Central..... 18
Figura 3.1 Gestion del riesgo operacional y su relación con BowTie 36
Figura 3.2. Diagrama BowTie - controles preventivos y mitigadores..... 37
Figura 3.3. Criterio para definir si una medida es un control 44
Figura 3.4. Criterio para definir si un control es crítico 45
Figura 4.1 Elementos del modelo de gestión de presas de relave 49
Figura 4.2 Flujograma de la operación..... 64
Figura 4.3 Flujograma de mantenimiento..... 72
Figura 4.4 Flujograma de vigilancia..... 77
Figura 5.1 Perfil de la presa de relaves Chinchan..... 117
Figura 5.2 Mecanismos de falla..... 119
Figura 5.3 Ejemplo de una típica matriz de evaluación de riesgos cualitativa..... 120
Figura 5.4 Diagrama básico BowTie 121
Figura 5.5 Amenazas y consecuencias para el evento top 126
Figura 5.6 Imagen de la presa de relaves Chinchan en operación 129
Figura 5.7 Ilustración del concepto de definición de niveles de riesgo..... 131

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1 Cronología y clasificación por tipo de fallas. 3

Gráfico 1.2 Inventario de presas en el Perú 4

Gráfico 5.1 Estadísticas de incidentes en la presa de relaves Chinchan 129

LISTA DE MAPAS Y PLANOS

Mapa 1.1 Ubicación de las presas del Perú 5

Plano N°1 Plano de ubicación 48

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1 Funciones y responsabilidades 52

Tabla 4.2 Lista de comprobación para la selección y el diseño del emplazamiento de una instalación de relaves 88

Tabla 4.3 Lista de comprobación para la construcción 94

Tabla 4.4 Lista de comprobación para la operación 101

Tabla 4.5 Lista de comprobación para la retirada del servicio y cierre definitivo 109

Tabla 5.1. Matriz de clasificación por consecuencias 128

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El boletín número 121 de ICOLD (Comisión Internacional de Grandes Presas) y UNEP (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente) titulado «Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences (Lessons learnt from practical experiences)» menciona que a nivel mundial por año son dos los eventos de accidentes en presas de relave (contabilizando 221 casos en sus registros). Las consideraciones específicas mencionadas en el boletín son:

1. Selección e investigación del sitio
2. Presa inicial
3. Cimientos no satisfactorios
4. Falta de estabilidad de la pendiente corriente abajo
5. Cargas super impuestas
6. Problemas con los materiales de decantación
7. Deslizamientos
8. Terremotos
9. Balance incorrecto de agua y/o hielo
10. Embalses no retenidos por la presa

Ejemplos de catástrofes ambientales recientes por efecto de falla de presas de depósitos de relave:

- La presa del depósito de relaves Mount Polley en la provincia de British Columbia en el país de Canadá falló (04-08-2014) en su fundación dentro del terraplén del perímetro.
- La presa del depósito de relaves Fundão en el estado de Minas Gerais en el país de Brasil falló (05-11-2015) por una licuación* que se inició en el estribo izquierdo de la presa.

* Un proceso por el cual el material rápidamente pierde casi toda su cohesión y fluye como un fluido. Es la pérdida total de la resistencia al corte del material de relaves del depósito, por incremento de la presión de poros.

- La presa del depósito de relaves Brumandinho en el estado de Minas Gerais en el país de Brasil falló (25-01-2019) por una licuación liberando 9´670,000 de m^3 de relaves.

Es una estadística pésima del sector minero que causa el deterioro de nuestro ambiente. Lo que indica que hay mucho por hacer en materia de regulación y análisis de la industria minera a nivel mundial.

El Perú es un país cuyo crecimiento económico es dependiente de la minería por ser ésta la actividad económica más importante, la minería representa más del 50% de las divisas, el 20% de la recaudación fiscal, el 11% del Producto Bruto Interno (PBI), la mayor parte de la inversión extranjera, entre otros destacados factores macroeconómicos. La minería juega un rol importante en la economía peruana a través de la generación del valor agregado, divisas, impuestos, inversión y empleo. Negarse a la ejecución de nuevos proyectos mineros (Manhattan, Conga, Tía María) por los impactos ambientales que ocasionan, no soluciona el problema, la minería es necesaria para el desarrollo de nuestro país. Por esta razón este trabajo ayuda a mejorar de la gestión de presas de relave para disminuir los riesgos ambientales y de seguridad.

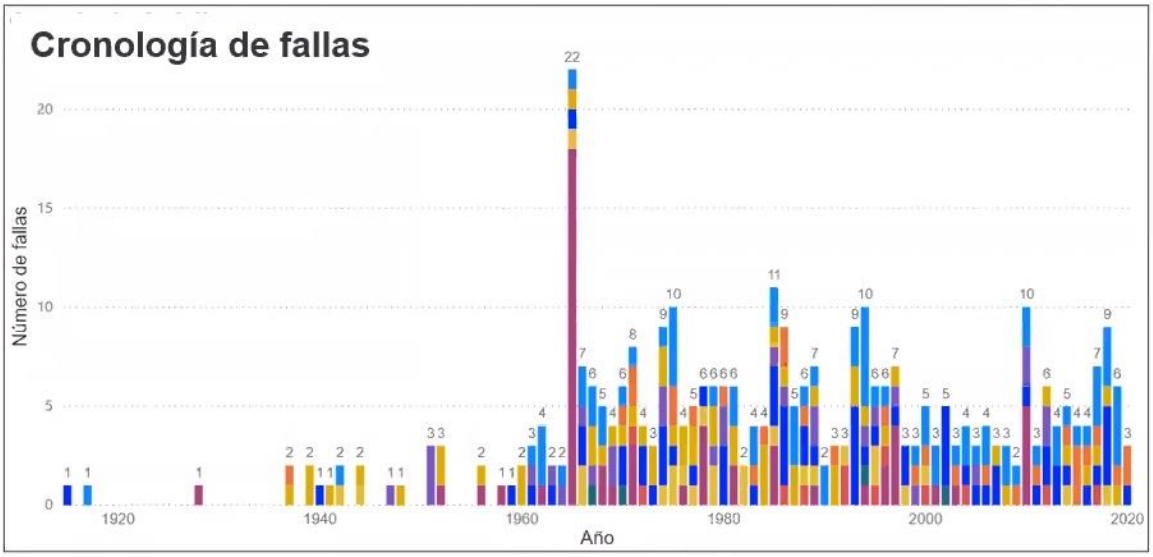
1.1. Planteamiento del problema

En junio del año 2010 en el departamento de Huancavelica colapsó la presa del depósito de relaves de la unidad minera Caudalosa Chica de la Compañía Minera Caudalosa S.A. liberando un volumen de 22 616 m^3 de relaves causando una catástrofe ambiental contaminando los ríos Escalera, Huachocolpa, Lircay y Opamayo. El peritaje realizado por especialistas del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) del Ministerio del Ambiente concluyó: 1) La presa carecía de muros de contención y el dique estaba hecho con desechos sólidos, no reforzado e incluso fue ampliada sin autorización. 2) El desembalse de relaves fue debido a que la presa no contaba con un sistema para evacuar las aguas residuales. 3) La sobrecarga que tuvo la presa era producto del exceso de agua que se almacenaba allí. 4) El depósito de relaves no contaba con instrumentos para medir la presión, tampoco tenía indicadores visuales para alertar sobre el peligro de deslizamientos o desbordes. 5) La empresa minera no cuenta con un plan de manejo ambiental del lodo y los relaves. En marzo del año 2018 en el departamento de Ancash

falló la presa del depósito de relaves N°2 de la unidad minera Huancapetí de la Compañía Minera Lincuna S.A. liberando un volumen de 11 860 m^3 de relaves afectando la Quebrada Shipchoc. En julio del 2019 en el departamento de Huancavelica falló la presa del depósito de relaves área Norte de la unidad minera Cobriza de la Compañía Doe Run Perú liberando un volumen de 12 000 m^3 de relaves afectando el río Mantaro. Estos accidentes de contaminación ambiental nos plantean un problema que podemos enunciarlo como: la gestión para disminuir los riesgos ambientales y de seguridad de depósitos de relaves es insuficiente.

1.1.1. Fundamentación del problema

Actualmente se tiene un registro de 351 fallas de presa de depósitos de relave, la primera registrada es esta estadística ocurrió en el año 1915 y se tiene registro hasta la actualidad (2020).



Causas de falla		
SI	Inestabilidad de talud	
SE	Filtración y erosión interna	
FN	Cimentación	
OT	Overtopping	
ST	Estructural	
EQ	Sismo	
MS	Subsidencia	
ER	Erosión externa	
U	Desconocido	

Gráfico 1.1 Cronología y clasificación por tipo de fallas

Fuente: Tomado del Seminario web “Consideraciones para el análisis de rotura de presas de relaves” Miguel Huaman Aguilar – Anddes Asociados SAC – octubre 2020

Hay un tramo de 1920 hasta 1960 donde aparentemente no se han registrado la ocurrencia de fallas de presa como se muestra en la figura 1.1 entre la década del 60 hasta el año 2000 se puede apreciar una media elevada de fallas de presa por año.
Desde el año 2000 al 2010 esta media bajo, sin embargo, los últimos 10 años esta media se está elevando, lo que es o debe ser causa de preocupación.
Las empresas mineras que benefician su mineral por métodos de concentración producen relaves que son depositados utilizando presas, en el Perú la Autoridad Nacional del Agua (ANA) presentó en el 2015 el estudio del inventario de presas en el Perú.

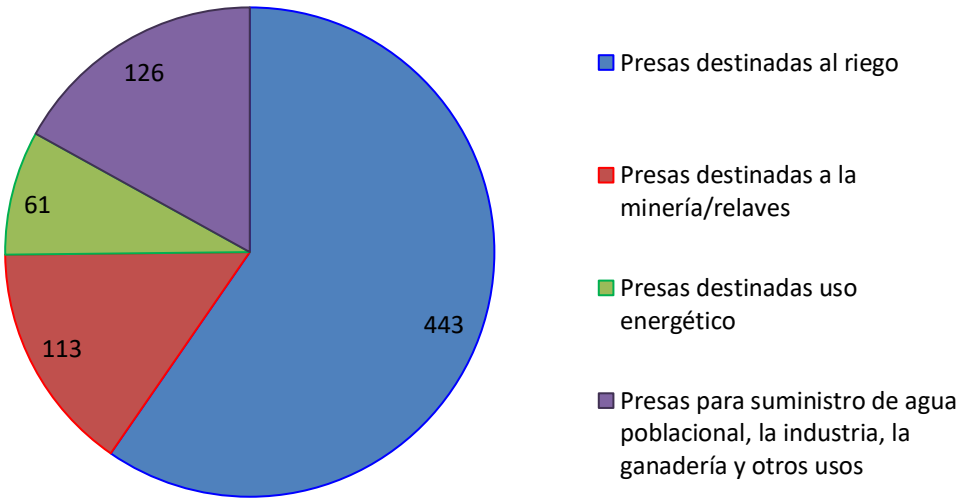


Gráfico 1.2 Inventario de presas en el Perú – clasificación por uso
Fuente: Inventario de presas en el Perú - ANA. Elaboración: Propia

Donde se han inventariado 743 presas, según la clasificación por el uso, 113 presas están destinadas a la minería/relaves.
Todas estas cifras y hechos nos muestran la importancia de mejorar el sistema para la gestión de presas de relave construidas en el Perú. Para cumplir con los objetivos y metas impuestos por los grupos de interés, las empresas mineras deben garantizar el cuidado del ambiente.
Concluimos que es de vital importancia proporcionar estudios que aporten un nuevo conocimiento sobre este campo de la gestión.

Código	Autoridad Administrativa del Agua
I	Caplina-Ocoña
II	Chaparra-Chincha
III	Cañete-Fortaleza
IV	Huarmey-Chicama
V	Jequetepeque-Zarumilla
VI	Marañón
VII	Amazonas
VIII	Huallaga
IX	Ucayali
X	Mantaro
XI	Pampas-Apurímac
XII	Urubamba-Vilcanota
XIII	Madre de Dios
XIV	Titicaca

Mapa 1.1 Ubicación de las presas del Perú

Fuente: Tomado del *Reglamento de seguridad de presas (p.13) (2019) ANA*

1.1.2. Formulación del problema

Si las empresas mineras que usan presas de relave no gestionan el riesgo seguiremos presenciando contaminación ambiental en el país, entonces ¿Es necesario mejorar el modelo de gestión de presas de relave para reducir el nivel de riesgo hasta que éste sea aceptable, de forma que se eviten impactos ambientales negativos?

1.1.3. Delimitación

1.1.3.1. Delimitación espacial

El espacio que se considera para la investigación es el depósito de relave Chinchan.

1.1.3.2. Delimitación temporal

El periodo cronológico que abarca esta investigación inicia en el mes de julio 2020 y concluirá en setiembre del 2021, tiempo que se empleará para su desarrollo.

1.1.3.3. Delimitación social

Será objeto de este estudio la presa Chichan construida para almacenar el relave producto del beneficio de minerales, ubicada cerca a comunidad que comparten los cuerpos receptores de agua.

1.1.4. Objetivos de la investigación

1.1.4.1. Objetivo general

Mejorar la gestión de la presa de relaves para disminuir los riesgos ambientales y de seguridad, de acuerdo con las mejores prácticas de ingeniería y conforme a la legislación aplicable.

1.1.4.2. Objetivos específicos

1) Reducir la cantidad de incidentes y no conformidades de auditorías en la presa de relaves Chinchan.
2) Identificar el modo creíble de falla más relevante entre todos los modos de falla potenciales para la presa.
3) Utilizar la metodología de árbol de fallos y sucesos indicadores (BowTie) para identificar los peligros, amenazas, medidas preventivas, controles críticos, evento top, medidas mitigadoras y consecuencias del evento no deseado especifico.

1.1.5. Justificación e importancia del proyecto

1.1.5.1. Conveniencia

Los depósitos de relaves han ido creciendo en tamaño y antigüedad en las últimas décadas, debido a expansiones mineras de mayores dimensiones, mayores tasas de

operación (mayor producción) y a la necesidad de concentrar la disposición de relaves en un solo lugar, es conveniente definir modelos en la gestión de presas de relave con las herramientas necesarias para una operación segura.

1.1.5.2. Relevancia social

Lograr garantizar operaciones seguras de presas de relave de forma que se minimice impactos en el ambiente de los peruanos que viven en las comunidades dentro del área de influencia.

1.1.5.3. Implicancia práctica

La gestión de las presas de relave debe estar garantizada en sus fases de construcción y puesta en operación; implica cuidado del ambiente en el transporte y contención de relaves, en el manejo de efluentes y recirculación o reciclaje del agua utilizada.

1.1.5.4. Utilidad metodológica

La utilidad metodológica de la investigación radica en llegar a obtener la mejora de gestión de presas de relave y prevenir impactos en el ambiente.

1.1.5.5. Viabilidad de la investigación

La investigación será viable por la disposición de los recursos económicos y humanos dentro del tiempo con el que se cuenta.

1.1.6. Alcances y limitaciones de la investigación

El alcance de esta investigación serán las instalaciones de la presa de relave Chinchan. Una posible limitación de esta investigación será el acceso al contenido de los informes de investigación y casos de estudio de las fallas de presas de relave ocurridas recientemente en el mundo.

1.2. Hipótesis

1.2.1. Planteamiento de la hipótesis de investigación

Según los objetivos que se alcanzaran en la investigación, se pueden plantear las siguientes hipótesis.

1.2.1.1. Hipótesis general

La gestión de la mayoría de los depósitos de relaves en el país no aplica el ciclo de mejora continua planteada por Edwards Deming.

1.2.1.2. Hipótesis específica

La mejora continua de la gestión de presas de relave reduce el nivel de riesgo y su implementación evita impactos ambientales negativos.

1.3. Identificación y clasificación de las variables

1.3.1. Variable dependiente

- Ancho de corona de la presa de relave
- Pendiente del talud
- Cota máxima de crecimiento
- Borde libre de operación
- Gestión de los relaves
- Porcentaje de finos y gruesos en las arenas de relave
- Porcentaje de humedad del relave

1.3.2. Variable independiente

- Geología del yacimiento minero
- Método de explotación
- Procesos metalúrgicos de concentración
- Conminución del mineral

1.4. Metodología de la investigación

1.4.1. Método de investigación

Se utilizó el método inductivo.

1.4.2. Tipo y nivel de investigación

El tipo de investigación será exploratoria puesto que el tema de gestión de presas de relave que recrecen por el método línea central no ha sido suficientemente estudiado para proponer un modelo de gestión.

La investigación será de nivel descriptiva puesto que se desea describir la problemática referida a los daños al ambiente producidos por fallas en las presas de relaves y también es explicativa porque intentaremos definir o identificar las causas del problema.

1.4.3. Diseño de investigación

El diseño de la investigación será contemporáneo – transversal porque se desea obtener la información de un evento actual y se estudiará la problemática en un único momento del tiempo.

1.4.4. Población y muestra

La muestra de la investigación es la presa de relaves Chinchan de una unidad minera que procesa minerales de plomo, zinc, cobre y plata.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

Los antecedentes de estudio corresponden a cuatro tesis descritas a continuación:

Dentro del país se realizó el estudio en la presa de relaves Chinchan de la empresa Minera Yauliyacu S.A. hecho por el ingeniero Pedro Solís donde analiza la estabilidad física y química e implicancias ambientales de dicha presa en el año 2000.

Se ha realizado un estudio para el diseño de la presa de relaves Alpamarca utilizando material de mina (relave y desmonte de mina) como cuerpo de presa, hecho por el ingeniero Aquiles Villanueva en el año 2006, donde analiza las características físicas de la presa de relaves y sus criterios de diseño basados en estudios de geomorfología, geología, geotecnia, hidrología y sismicidad.

Se ha realizado un estudio de los riesgos y fallas inducidas por sismos y su impacto en el medio ambiente en la presa de relaves de la empresa minera Austria Duvaz, hecho por el ingeniero Paulino Avellaneda en el año 1999, donde presenta el procedimiento de análisis para verificar la estabilidad física utilizando las técnicas convencionales de análisis de estabilidad de taludes, sometidos a cargas estáticas y dinámicas; incorporando el análisis del potencial de licuación por presencia de agua y potencial de deformación post sismo del depósito de relaves.

Se ha realizado un estudio de licuación dinámica para el recrecimiento de la presa de relaves Pachapaqui, hecho por los ingenieros Anton Vopilovsky y Luis Urbina en el año 2015 aplicando dos métodos de evaluación (el método de Olson y el método de H.B. Seed y I.M. Idriss).

2.2. Características de los relaves

2.2.1. Tipos de residuos mineros

Hay diferentes y variados residuos mineros, en esta tesis se mencionarán solo los residuos sólidos y líquidos generados por la concentración de minerales con contenido de metales básicos (plomo, zinc, cobre, y plata), estos metales se encuentran en el yacimiento como sulfuros.

Desmonte de mina: “es roca extraída durante el minado para tener acceso al mineral, el desmonte de mina es importante en el contexto del manejo de relaves porque puede

proporcionar material de buena calidad para la construcción del dique de una presa superficial, sin embargo, pueden ser una fuente potencial de drenaje ácido". (Guía Ambiental para el manejo de relaves mineros – MINEM,1997).

Relaves: "se definen como el desecho mineral sólido de tamaño entre arena y limo provenientes del proceso de concentración que son producidos, transportados o depositados en forma de pulpa." (Guía Ambiental para el manejo de relaves mineros – MINEM,1997).

2.2.2. Propiedades físicas y estructurales

Las características físicas de los depósitos de relaves dependen fundamentalmente de la forma hidráulica de su deposición. Estas propiedades son importantes para comprender cómo responderá el depósito a la carga, a la infiltración y al movimiento sísmico.

Características de la deposición: "Los relaves son casi siempre transportados desde la concentradora a través de una tubería, en la forma de pulpa (mezcla de agua y sólidos), en concentraciones que van de 20 a 50% de sólidos en peso. En superficie la pulpa es descargada desde la cresta del dique por una reubicación periódica del extremo de la tubería de descarga. Conforme los sólidos se asientan a partir de la pulpa descargada, se forma una playa de leve inclinación que se extiende desde el punto de descarga hasta la poza de decantación donde el agua remanente de la pulpa se acumula para ser recirculada a la planta concentradora". (Guía Ambiental para el manejo de relaves mineros – MINEM,1997).

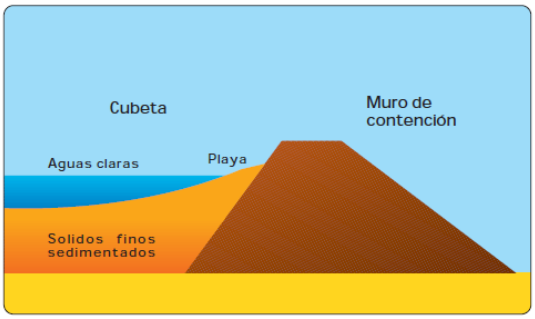


Figura 2.1 Depósito de relaves

Fuente: Tomado de *Construcción y operación de tranques de relaves* [figura online] Available from http://www.sernageomin.cl

En teoría, el material más grueso se asienta inicialmente a partir de la pulpa, las partículas más finas se asientan más lejos de la playa, y las mucho más finas, del tamaño de arcillas y limos, se asientan en la poza de decantación dando lugar al modelo altamente idealizado de segregación por tamaño y permeabilidad relativa. Esto crea zonas de relaves dentro del depósito que están segregadas por el tamaño del grano y que son conocidas por la siguiente terminología:

Arenas: "arenas de relaves, o relaves arenosos, son materiales predominantemente más grandes que 0.074 mm lo que significa que menos del 50% son más finos que ese tamaño".

Lamas: "son predominantemente materiales del tamaño del limo, más del 50% menor de 0.074 mm". (Guía Ambiental para el manejo de relaves mineros – MINEM,1997).

La granulometría del relave global queda determinada por el proceso de molienda en la concentradora. La molienda debe basarse no solamente en una óptima recuperación del metal sino en la óptima combinación de la deposición de relaves, el método de minado y los factores de recuperación, tomados todos en conjunto.

Propiedades estructurales:

Las propiedades estructurales son aquellas características geotécnicas de los depósitos de relave que gobiernan su comportamiento frente a la estabilidad, infiltración y deformación. Las propiedades estructurales básicas, incluyen resistencia, permeabilidad y compresibilidad, y en el caso de los depósitos de relaves estas propiedades dependen notablemente de si predominan las arenas o las lamas y del grado inter estratificación. "La resistencia de los relaves arenosos está mejor representada por el ángulo de fricción interna el cual es mayor que el de la mayoría de los suelos naturales debido a la angularidad de las partículas del relave que la molienda produce. Las lamas, sin embargo, son débiles y compresibles, y la baja resistencia al corte del material sin drenaje, determina su comportamiento". (Ladd ,1991 y Vick, 1992).

La permeabilidad de los relaves arenosos varía aproximadamente de 10^{-3} a 10^{-4} cm/s, mientras que las lamas oscilan en el rango de 10^{-5} a 10^{-6} cm/s, dependiendo de la presión total efectiva a que estén sometidos.

2.2.3. Características químicas

Es aparente, desde un punto de vista físico que los relaves son un material manufacturado y la naturaleza básica del proceso admite algunas generalizaciones

razonables sobre el asunto. Esto no es así, con respecto a las características químicas que pueden variar ampliamente de un yacimiento a otro. Varios depósitos de características diferentes, cada uno con distinta geoquímica, pueden ser explotados a lo largo de la vida de la mina, ocasionando las variaciones correspondientes en las características químicas de los relaves producidos.

Los residuos de reactivos utilizados en flotación acompañan tanto a los relaves sólidos como a los líquidos descargados con los relaves. Los reactivos de flotación pueden ser cal, ditiofosfatos, xantatos, cromatos, sulfitos, sulfato de cobre, sulfato de zinc, ácidos grasos, alcoholes, aceites y cianuro entre otros. Con la excepción del cianuro la mayoría de los demás reactivos de flotación; existen en formas no tóxicas para los humanos y la vida acuática. Generalmente se aplican en pequeñas concentraciones en las operaciones más eficientes; los reactivos orgánicos de flotación se descomponen rápidamente y son rara vez responsables de algún impacto ambiental serio.

Efluentes cianurados

El cianuro en los efluentes de los relaves incluye cianuro libre (CN y HCN), así como formas complejas en asociación con varios metales que tiene variada solubilidad y toxicidad. El cianuro libre es químicamente inestable. Por lo tanto, a diferencia de muchos otros contaminantes, no persiste en el ambiente ni tampoco es bio-acumulable a través de la cadena alimenticia. En efecto, el cianuro está presente en muchos alimentos comestibles, tales como las almendras y los frijoles, y es realmente metabolizado por muchos organismos en concentraciones similares a aquéllas que se encuentran en algunos efluentes de relaves. (Howe, 1984).

“Un número de procesos naturales contribuyen a la natural degradación del cianuro libre, incluyendo volatilización, oxidación, fotodescomposición, y degradación microbiana” (Simovic, et al, 1984). De éstos, la volatilización es la más importante y se incrementa notablemente conforme el pH inicialmente alcalino de los efluentes cianurados se va transformando en neutro a medida que el tiempo de retención en el depósito de relaves se incrementa. “El cianuro usado en pequeñas cantidades como un reactivo de flotación para la depresión del cobre, por ejemplo, en circuitos de cobre y plomo, resulta típicamente en concentraciones de 5 a 10 mg/l en los efluentes de los relaves” (Von Michaelis, 1984); estas concentraciones son casi siempre rápidamente reducidas por los procesos naturales en las pozas de decantación de los depósitos de

relaves y alcanzan niveles por debajo de los estándares de agua de bebida establecidos por la EPA, que son de cerca de 0.2 mg/l de cianuro libre (CN-). Por razones similares, el cianuro de flotación es rara vez medido en concentraciones detectables. Los procesos naturales son usualmente considerados adecuados para mitigar los efectos ambientales del cianuro de los relaves de flotación, excepto donde los requerimientos para proteger el agua superficial o subterránea son inusualmente severos o cuando hay poco o ningún tiempo de retención en el depósito, con anterioridad a la descarga.

Drenaje Acido de Relaves (ARD):

"El ARD se refiere a procesos por los cuales el pH del agua en contacto con los relaves puede disminuir severamente, dando como resultado la disolución y transporte de metales tóxicos disueltos tales como arsénico, plomo, cadmio, y un conjunto de otros, además un drástico incremento del contenido de los sulfatos. Es casi imposible detener completamente el proceso una vez que se ha iniciado, y los efectos de la acidificación pueden continuar por muchos siglos" (Guía Ambiental para el manejo de relaves mineros – MINEM,1997).

Existen, sin embargo, varios requisitos para que este proceso ocurra:

"La primera condición necesaria para el ARD es que los minerales sulfurados estén presentes en los relaves, principalmente pirita, pero también otras formas aún más reactivas tales como la pirrotita y la marcasita. Esto puede ser determinado frecuentemente en forma cualitativa a partir de la información geológica respecto al cuerpo mineralizado, pero otra señal puede ser la alta gravedad específica de los relaves. Aunque los relaves de los minerales metálicos están compuestos principalmente de minerales de silicato o carbonato con gravedad específica (Gs) de 2.65-2.85, ellos contienen al menos pequeñas cantidades de metales no recuperados y hierro del proceso de molienda (barras de acero o bolas) que típicamente resultan en una gravedad en el rango de 2.8-2.9 para los minerales bajos en sulfuros. Por contraste, los relaves altos en sulfuros a menudo exceden considerablemente este rango, con una gravedad específica que a menudo se ubica sobre 3.5, por ejemplo, para el caso de los relaves polimetálicos peruanos que normalmente contienen de 10 a 60% de pirita.

En presencia de aire, la segunda condición, las superficies del mineral sulfurado se oxidan en una reacción compleja que involucra varios pasos químicos ayudados por

bacterias, para formar ácido sulfúrico. Sin embargo, esta reacción por sí sola causará grandes problemas sólo si los relaves contienen cantidades insuficientes de otros minerales que consumen ácido (por ejemplo, carbonato de calcio) para neutralizar el ácido, lo cual es la tercera condición necesaria. La condición final es que los contaminantes producidos deben ser transportados de los depósitos de relaves hasta los terrenos receptores o aguas superficiales, usualmente por infiltración y drenaje. Considerando el conjunto de estas cuatro condiciones que son necesarias y suficientes para que se presente el problema del ARD, existe la posibilidad de que no se presenten problemas serios si uno de ellos está ausente". (Guía Ambiental para el manejo de relaves mineros – MINEM,1997).

Si existe potencial para ARD, hay varias medidas de mitigación que pueden ser consideradas.

La oxidación de sulfatos puede ser iniciada únicamente si existe oxígeno en los intersticios del depósito de relaves y pueden por lo tanto ser prevenido si este oxígeno es eliminado. Una manera efectiva de hacerlo es manteniendo los espacios vacíos llenos con agua y el depósito totalmente saturado.

La oxidación de los sulfatos también puede ser retardada si el ingreso del oxígeno al depósito es restringido, por ejemplo, cubriendo la superficie del depósito de tal manera que la velocidad de difusión del oxígeno a través de la cobertura sea menor que el requerimiento de oxígeno por las reacciones químicas de ARD. Aún si el ARD se ha iniciado dentro del depósito, la dispersión de sus efectos puede ser reducida si hay insuficiente infiltración para transportar los constituyentes disueltos más allá de los límites del depósito mismo. La infiltración puede también ser reducida por coberturas, en combinación con la derivación del agua superficial y un apropiado tratamiento de la superficie del depósito.

Sismicidad:

"El peligro más grande para las instalaciones de relaves a partir de los terremotos en el Perú, se deriva sin embargo de la licuefacción sísmica la cual puede afectar tanto a los relaves saturados como a los suelos naturales saturados que están debajo de un depósito, a menos que ellos tengan una alta densidad. Además de todos los tipos de relaves, los tipos de suelos naturales incluyendo limo, arena y grava son también susceptibles de licuefacción, la misma que ocurre cuando las cargas cíclicas causan que la presión de poro en los vacíos saturados del material se incremente durante o

inmediatamente después del sacudimiento producido por el terremoto. Esto a su vez, causa que el material pierda resistencia, experimente grandes deformaciones, y se comporte esencialmente como un fluido". (Guía Ambiental para el manejo de relaves mineros – MINEM,1997).

El chancado y molienda de minerales genera un volumen de relaves que es, aproximadamente, dos tercios más grande que el volumen original del mineral «in situ». Dónde y cómo colocar estos relaves en forma que sea económicamente factible, así como física y químicamente estable es tal vez el mayor problema ambiental, asociado con el desarrollo minero.

Las presas grandes de relaves, y particularmente aquellas ubicadas en regiones sísmicas, requieren que se efectúe mediciones de los fenómenos sísmicos. Esto se puede realizar con los llamados "acelerógrafos de movimientos fuertes" para registrar los terremotos más fuertes por sobre un umbral dado, que puede ser variado a voluntad, y que generalmente es 0.01 g. Como mínimo, se debería emplear dos o tres acelerógrafos. Un acelerógrafo, el "principal" o el "maestro", es colocado sobre el lecho de roca para registrar el terremoto. Envía señales a una computadora que controla a las demás, que están ubicadas en las excavaciones superficiales en diferentes lugares de la parte superior del talud aguas abajo. Estas son trasladadas periódicamente durante las operaciones para que estén en la parte superior del talud, y después que la presa de relaves deja de operar, son colocadas sobre la playa en los relaves. Estas se emplean para determinar las propiedades de amortiguación de relaves, y la respuesta dinámica requerida para calibrar el modelo numérico sísmico y calcular la respuesta a terremotos de la presa de relaves.

2.3. Tipos de crecimiento de presas

Las presas de relaves son usualmente levantadas progresivamente de acuerdo con el incremento en altura de los relaves en el embalse. Las presas de relaves elevadas son de los tres tipos básicos; todos ellos comienzan con un dique de arranque construido de tierra o de relleno rocoso y luego son llenados con los relaves descargados, pero sólo hasta allí llegan las semejanzas.

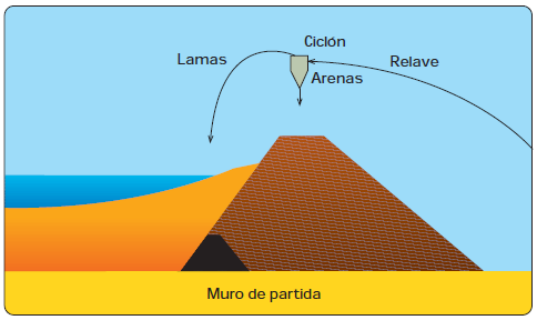


Figura 2.2 Construcción del muro con arenas de relave

Fuente: Tomado de *Construcción y operación de tranques de relaves* [figura online] Available from http://www.sernageomin.cl

2.3.1. Tipo aguas arriba

La presa es levantada por la construcción progresiva de «diques perimétricos» sobre la superficie de la acumulación de relaves precedente, de tal manera que cada dique avance sucesivamente hacia el interior conforme la presa es levantada. La característica de este método es que la integridad estructural de la presa está gobernada por las propiedades y comportamiento de los relaves descargados hidráulicamente los cuales forman la base del talud de la presa.

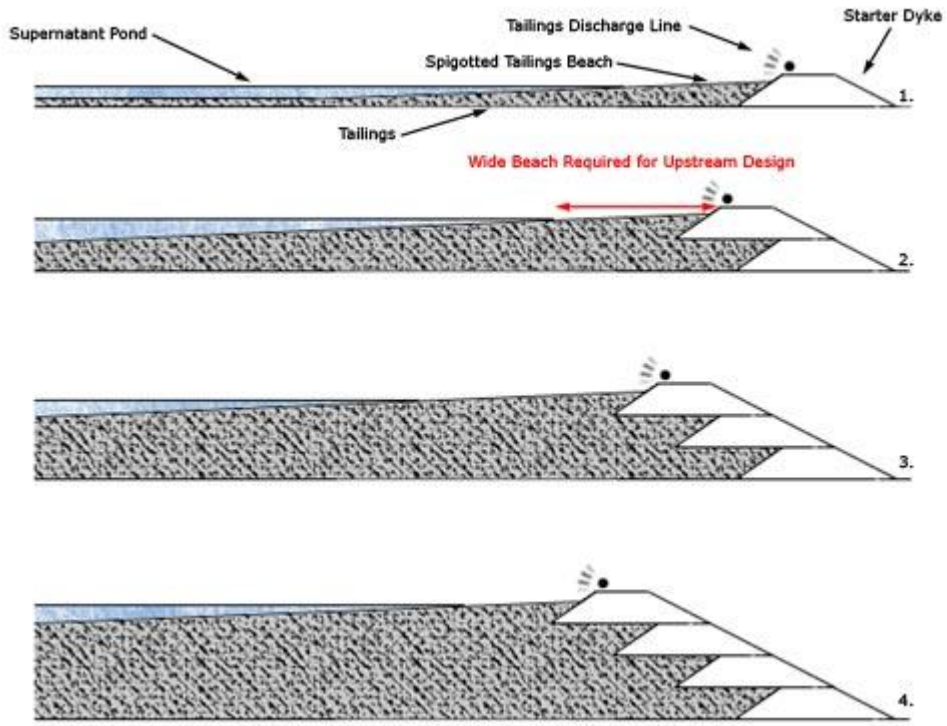


Figura 2.3 Crecimiento aguas arriba

Fuente: Tomado de *Conventional Impoundment Storage - The current techniques* [figura online *Upstream method of embankment construction*] (© Jon Engels) https://www.tailings.info/disposal/conventional

2.3.2. Tipo aguas abajo

Son levantadas colocando material adicional de relleno en el talud «aguas abajo», o exterior del levantamiento previo. El relleno de la presa, que puede consistir en material de varios tipos, no tiene como basamento relaves depositados hidráulicamente, y las propiedades de estos materiales de relleno pueden ser especificados y controlados para asegurar que sus características sean las adecuadas. Al final, el método «aguas abajo» alcanza una configuración muy similar a la de una presa convencional de retención de agua, con similares características estructurales en la mayor parte.

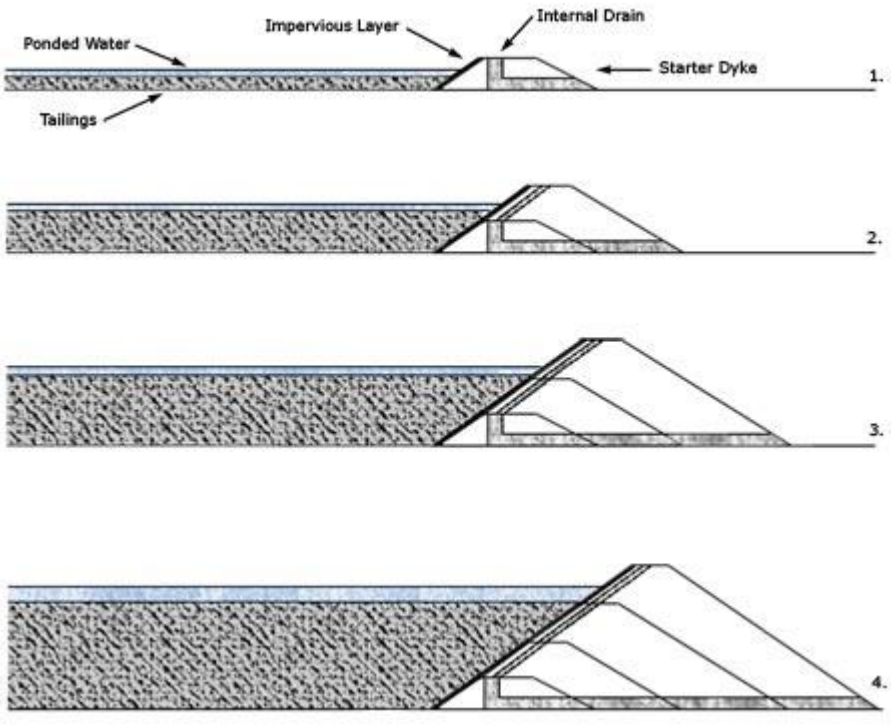


Figura 2.4 Crecimiento aguas abajo

Nota. Tomado de *Conventional Impoundment Storage - The current techniques* [figura online *Downstream method of embankment construction*] (© Jon Engels) Available from https://www.tailings.info/disposal/conventional

2.3.3. Tipo línea central

Se levanta colocando el relleno de la represa en el talud «aguas abajo» y sobre la cresta de la elevación previa. El método de «línea central» comparte muchas de las características estructurales de las presas tipo «aguas abajo», pero usa menos material de relleno para alcanzar la misma altura.

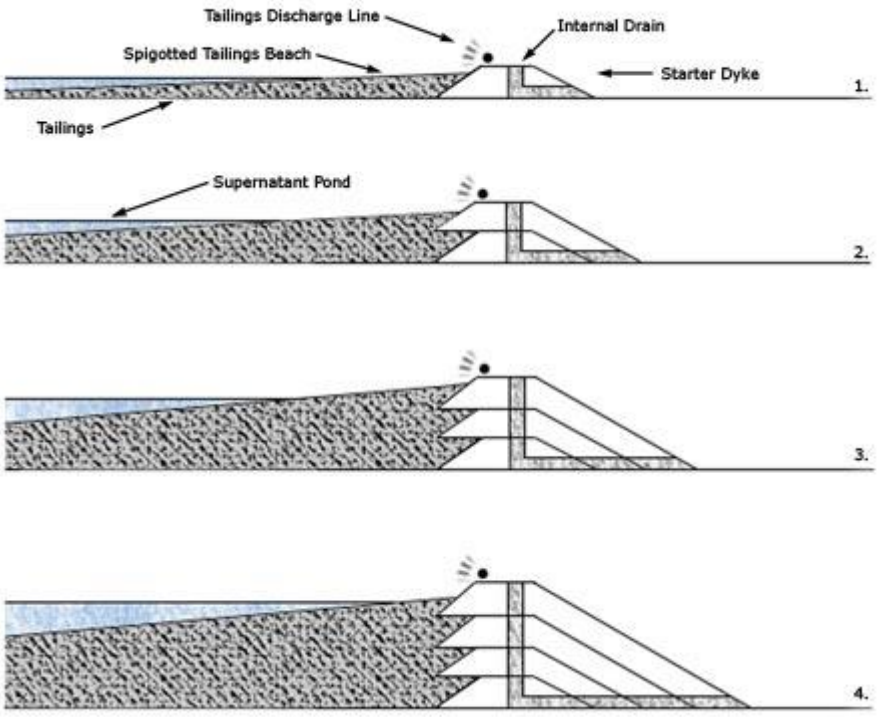


Figura 2.5 Crecimiento línea Central

Fuente: Tomado de *Conventional Impoundment Storage - The current techniques* [figura online *Centre line method of embankment construction*] (© Jon Engels) Available from https://www.tailings.info/disposal/conventional

2.4. Monitoreo y mantenimiento de depósitos de relave

El titular minero deberá encargarse de satisfacer todas las reglamentaciones relacionadas con la seguridad estructural y ambiental de los depósitos de relave, deberá proporcionar a la agencia reguladora todos los informes y datos relacionados que se requiere en cada etapa de desarrollo de un depósito comenzando con los informes de investigación del sitio y de diseño requeridos para obtener una licencia

para construir el depósito, continuando con informes de construcción e informes de operación y finalizando con los informes de cierre y rehabilitación.

El titular minero debería estar obligado a informar inmediatamente a la agencia reguladora sobre cualquier evento inusual relacionado con el aumento de percolación, inestabilidad, la falta de borde libre de líquido, etc., que afecte o pueda afectar la estabilidad del depósito.

El diseñador debería participar en inspecciones y evaluaciones de seguridad. Si esto no fuera posible, debería mantenerse informado de los hallazgos de las inspecciones y evaluaciones de seguridad en las cuales no ha participado. También, a él se le debería consultar sobre los trabajos de reparación o rehabilitación, si es posible y práctico, durante la vida de servicio de depósito de relave. Según un cronograma predeterminado se debería revisar por lo menos cada dos años si los instrumentos y dispositivos de monitoreo funcionan adecuadamente. La secuencia y frecuencia de la lectura de los instrumentos de monitoreo y los dispositivos de observación debería seguir las instrucciones dadas por el diseñador. Estas instrucciones eventualmente pueden ser adaptadas a prioridades que cambian de acuerdo con la edad de la estructura.

En el caso de sistemas de monitoreo automatizado, las lecturas de los instrumentos de monitoreo y de los dispositivos de observación deberían ser transmitidas inmediatamente a la unidad de procesamiento. El procesamiento y la interpretación de los datos procesados debería efectuarse sin demora. Se debería efectuar una inspección anual completa de todos los aspectos de los depósitos de relaves incluyendo la presa, la poza, el sistema de recuperación y los procedimientos de inspección que se están empleando. Junto con esta inspección anual, se debería revisar toda performance, control de calidad, calidad de agua y datos de monitoreo para asegurar que la instalación esté siendo construida y esté funcionando de acuerdo con el propósito del diseñador. Son de particular importancia el agua de percolación recolectada de drenajes, los pozos de alivio y los piezómetros ubicados aguas abajo de la instalación para almacenamiento de relave. Se debería analizar estas percolaciones para averiguar el contenido de productos químicos, metales pesados, etc. para determinar si los contaminantes se están escapando de la instalación de almacenamiento y están entrando a las aguas superficiales y subterráneas aguas abajo del depósito de desechos. Cada inspección debería estar precedida por una

evaluación de los informes de inspección previos, y por la determinación de la secuencia que debe seguirse en el campo. Para este propósito, sería recomendable preparar una lista de verificación detallada de todos los ítems que deben ser inspeccionados y establecer las pruebas o exámenes que se deberían tomar a cada ítem. Esta lista debería ser revisada cuidadosamente y actualizada antes de cada inspección principal, prestando especial atención a los incidentes, alteraciones y/o modificaciones operacionales que pueden haber ocurrido desde la última inspección. El equipo de inspección debería revisar si se ha llevado a cabo las recomendaciones previas. Si estas no fueron realizadas, deberían estar documentadas y registradas las razones en el informe de inspección. En el informe de inspección debería estar resumido una descripción de los métodos y procedimientos empleados para la inspección y los hallazgos y recomendaciones resultantes. Donde sea adecuado, el texto debería estar complementado por dibujos, esquemas o gráficos y se debería emplear documentación fotográfica en forma extensiva. Asimismo, se debería incluir registros de incidentes o accidentes que puedan haber ocurrido recientemente, así como un análisis de sus causas y consecuencias. Se debería elaborar mapas de las irregularidades detectadas para referencia futura y comparación. Si se considera necesario alguna acción de recuperación, debería ser propuesto mediante recomendaciones claras. Este informe debería prepararse inmediatamente después de terminar la inspección y emitirse sin demora. La inspección de la construcción de la presa de arranque, incluyendo la instalación y la lectura de toda la instrumentación requerida para controlar la performance, debería ser efectuada por la empresa de ingeniería responsable del diseño de la presa de arranque. Normalmente el operador de mina realiza las operaciones progresivas continuas de la presa principal de relaves después de establecer el plan de construcción. Durante los primeros años de las operaciones, el operador de la mina debería conservar al diseñador para que inspeccione la construcción de la presa de relaves con el fin de asegurar que la construcción está procediendo de acuerdo el propósito del diseño. Si se encuentra que las condiciones reales de operación difieren de las asumidas en el diseño original, el diseñador debería efectuar las modificaciones apropiadas para el diseño, consultándolo con el operador de la mina, para asegurar que la presa de relaves se construya de una manera segura y aceptable. Sobre una base anual, las operaciones progresivas de la presa de relaves deberían ser inspeccionadas detalladamente y

revisadas por el diseñador original o por un ingeniero competente y con experiencia en la construcción de presas de relaves.

El operador de la mina debería afrontar el costo de dichas inspecciones. Por otro lado, se debería presentar al operador de la mina un informe completo junto con copias para la agencia reguladora que presente los resultados de la inspección y revisión y cualquier cambio recomendado en los procedimientos de operaciones/construcción que se considere necesario para asegurar la seguridad continua de las presas de relaves. Se debería establecer medidas y procedimientos adecuados para exonerar a las personas comprometidas en la inspección de cualquier conflicto de interés o responsabilidad personal que se pueda producir de dicha participación. Se debería iniciar un programa de monitoreo al comienzo de las operaciones de la presa de relaves y efectuar lecturas a intervalos apropiados durante todo el proceso operativo. También se debería instalar la instrumentación adecuada al término de la deposición de relaves dentro de la poza para monitorear la performance de la presa de relaves durante las fases de rehabilitación y de largo plazo.

Requerimientos de monitoreo: para una presa de relaves se recomienda los siguientes tipos de medición:

■ Medición e inspección visual diaria de todos los factores que influyen directamente en la seguridad de la presa:

- Ancho de la playa, el cual debería ser lo más grande posible
- Cantidad que la cresta de la presa está sobre el nivel del agua de la poza (borde libre de líquido)
- Descarga de percolación a través de la presa en sí, a través del cimiento y estribos
- Posición de la superficie freática y de cualquier daño que pueda surgir en el talud
- Presión de poros
- Movimiento horizontal y vertical de la cresta de la presa de arranque y del talud aguas abajo
- Sismicidad y presión de poros dinámica inducida
- Todos los procedimientos de deposición de relaves.

■ Medición y pruebas de todos los factores relacionados con la evaluación de estabilidad en cada etapa de construcción y especialmente cuando se aproxima a la altura máxima final:

- Distribución y zonificación de los relaves depositados
- Presión de poros
- Comportamiento de los relaves depositados en cada zona y la no linealidad de las propiedades mecánicas del suelo (densidad, resistencia al corte, compresibilidad, consolidación) con el incremento de la carga aplicada provenientes del resultado de laboratorio y de las pruebas in situ
- Sedimentación diferencial, registrada por los instrumentos de medición de movimientos internos
- Sismicidad y presión dinámica de poros y características dinámicas de los relaves depositados
- Se debe revisar la consolidación, sedimentación y estabilidad en la altura final durante los años de la elevación de la presa y si es necesario se debe mejorar la técnica de construcción y la estructura mediante drenaje instalados adecuadamente, bermas, inclinaciones del talud que mantengan una playa no sumergida más ancha, empleando hidrociclones, etc.

■ Mediciones que sirven para mejorar las técnicas de relleno hidráulico:

- Ancho de la playa
- Tamaño de partícula inicial de los relaves
- Densidad de pulpa
- Densidad de pulpa desde cada salida de la descarga de gruesos
- Distribución de los relaves depositados a lo largo de la playa según el tamaño de partícula, densidad y propiedades mecánicas del suelo.

Se podría obtener la distribución óptima de los relaves depositados y el mejoramiento de la estabilidad cambiando la descarga de pulpa desde las salidas de la descarga de gruesos y la densidad de pulpa (dilución con agua o espesamiento mediante hidrociclones) o disminuyendo la distancia entre las descargas de gruesos.

El monitoreo de los factores medidos se puede efectuar mediante los instrumentos y métodos tratados en las siguientes secciones. Descarga de percolación toda el agua de percolación debería ser recolectada y la descarga medida por vertederos en V de tipo rectangular o trapezoidal. Para medir descargas bajas se puede utilizar

recipientes calibrados. La descarga de percolación es el factor más importante que tiene que ser medido. Proporciona evidencia de cualquier falla seria en la presa de relaves. Indica la erosión interna en el cuerpo de la presa con consecuencias graves si todas las medidas necesarias no son tomadas en su debido momento. Esta medición debería ser automatizada, si es posible, y las lecturas registradas sin interrupción en el cuarto de control. Es apropiado registrar separadamente la descarga que proviene de cada drenaje y lugar, con el fin de determinar más fácilmente la ubicación de cualquier incremento de percolación y un posible caso de erosión. Es esencial para las presas de relaves tener buen drenaje para mantener la superficie freática lo más lejos posible del talud aguas abajo, con la finalidad de reducir la presión de poros y disminuir el peligro de licuefacción.

El drenaje aumenta la descarga de percolación, sin embargo, no es peligroso si hay filtros y drenajes funcionando apropiadamente y si la cantidad de percolación es recolectada y devuelta a la poza de relaves o a la planta de procesamiento. Los relaves son muy sensibles a la erosión tanto interna como externa y esto resalta una vez más la importancia del monitoreo de percolación. Se puede obtener valores más precisos de columnas reguladoras instaladas en los relaves, con sus filtros de toma colocados a corta distancia debajo de la posición de la superficie freática indicada por las columnas reguladoras de mayor profundidad. Se puede obtener más información de la forma de la red de flujo por medio de las columnas reguladoras colocadas con sus filtros de toma en las profundidades intermedias.

Si los piezómetros no tocan el cimiento, éstos se hunden lentamente en los relaves, especialmente aquellos que se encuentran en las partes internas de la playa o que se encuentran sobre la ubicación inicial de la poza. La cota de su extremo inferior se calcula midiendo periódicamente la cota de su extremo superior y conociendo la longitud de los tubos empleados. Después de que se levanta la presa de relaves a una altura significativa, se puede instalar piezómetros de columna reguladora perforando desde las crestas de los diques secundarios, desde la parte seca de la playa, o desde el talud aguas abajo. Los piezómetros de columna reguladora con un diámetro interno de 50 a 60 mm, como son empleados comúnmente en las presas de relaves, tienen bastante retardo (respuesta lenta). Estos pueden ser adecuados para zonas externas de las presas de relaves aguas arriba donde los relaves depositados son más gruesos y por lo tanto más permeables, o donde la superficie freática cambia

lentamente. En otras posiciones, se debería emplear, tubos de diámetros más pequeños como de 20 a 30 mm, o los piezómetros de columna reguladora de Casagrande con diámetro interno de 10 a 12 mm. Estos tubos de diámetros pequeños se colocan generalmente dentro de los tubos rígidos de revestimiento protectores de diámetro más grande. Cuando los piezómetros de columna reguladora son instalados mediante la perforación desde la playa, el tubo de plástico de 12 mm se puede suministrar en rollos y cuando se incluye a su unidad de filtro de toma, se puede instalar en el tubo de perforación protector. No se recomienda las columnas reguladoras permeables a lo largo de su altura total, o que deben estar rodeados por material de filtro permeable a lo largo de su altura total, debido a que crean una conexión vertical entre las partes superior e inferior de los relaves, donde las presiones de poros pueden ser muy diferentes. Si la presión de agua aumenta uniformemente con la profundidad, estos se comportan como pozos de observación, pero esta condición se aplica sólo a terreno homogéneo con líneas equipotenciales verticales. Sin embargo, en las presas de relaves estas condiciones no se aplican. Tiene una no homogeneidad bien desarrollada en la dirección vertical y anisotropía. Por este motivo, y también por el efecto de los drenajes, las líneas equipotenciales son inclinadas. En consecuencia, el pozo de observación no indica la altura real de la superficie freática. Cuando hay una mayor presión de poros excedente en las partes inferiores, la alivia, pero al mismo tiempo incrementa el nivel medido de la superficie freática. También se puede obtener la posición de la superficie freática con el uso de piezómetros cerrados. Se debería emplear varios, uno sobre el otro sobre una línea vertical, para obtener resultados más exactos. Sin embargo, es preferible emplear los piezómetros de columna reguladora simple, para determinar la posición de la superficie freática, si uno puede asegurar el acceso periódico a ellos. Es importante colocar los piezómetros cerca de los drenajes para verificar la eficacia de estos últimos. Los piezómetros de columna reguladora en las presas de relaves generalmente son fabricados con tubos de PVC de paredes gruesas. Existe peligro de que los tubos se vuelvan inclinados o que incluso se rompan en las zonas internas de la presa de relaves debido a la filtración de la masa de lamas. En estos lugares, y generalmente en las presas de altos relaves es mejor conseguir que los piezómetros de columna reguladora sean de material más fuerte, tales como tubos de plásticos reforzados con fibra de vidrio. Los tubos y los empalmes deben ser herméticos para resistir la alta presión y también

deben ser químicamente resistentes. Los tubos de acero se corroen rápidamente en medios de sulfato o de relaves en oxidación y deberían ser revestidos con zinc. Los tubos de aluminio no deberían emplearse si los medios de relaves son alcalinos. También se puede emplear piezómetros de columna reguladora no metálicos como indicadores internos de sedimentación. Se puede colocar alrededor de los tubos placas de sedimentación de metal no corrosivo, espaciadas a intervalos verticales casi iguales, y detectados por una unidad sensora magnética bajada al interior de las columnas reguladoras sobre un cable calibrado como una cinta para medir.

2.4.1. Medición de la presión de poros

Cuando la consolidación no está completa, la presión de poros incluye no sólo la presión de poros hidrodinámica, debido a la diferencia de carga entre los niveles de agua tanto aguas abajo como aguas arriba, sino también el componente de presión de poros excedente, generado durante la carga sin drenaje. La presión de poros puede ser muy alta en las partes internas de una presa de relaves. Es de crucial importancia para la seguridad de las presas de relaves altas y es imperativo que sea medido. Estimación de los niveles de piezómetros: debido a que los relaves son depositados en forma suelta, tienen baja densidad y sus deformaciones verticales pueden ser considerables, particularmente en la zona de lamas. Los piezómetros ubicados en los relaves siguen esta deformación vertical, y con el fin de asegurar que los piezómetros se sedimenten junto con los relaves y no se hundan en ellos, son colocados en plataformas anchas de madera. Siempre es necesario conocer la elevación actual de los piezómetros, y esto se puede efectuar de las siguientes maneras:

- Los dispositivos de nivelación de fluidos son colocados cerca de los indicadores de presión de poros sobre una plataforma común de madera o plataforma de material químicamente inactivo, con un peso unitario igual al de los relaves húmedos.
- Los indicadores combinados están disponibles en la actualidad y registrarán tanto la presión de poros sobre un principio de frecuencia como la posición vertical con un dispositivo hidráulico de nivelación. Estos tienen cables eléctricos que contienen tubos para el líquido de los aparatos de nivelación.
- Los piezómetros en los relaves están ubicados cerca de las columnas reguladoras más profundas que tienen placas apropiadas para medir las

sedimentaciones diferenciales. Las posiciones verticales de los piezómetros son evaluadas desde las lecturas de sedimentación.

2.4.2. Presión dinámica de poros y licuefacción

Existe un peligro de licuefacción de los finos y de la arena limosa en la presa de relaves como consecuencia de un terremoto. La presión dinámica de poros se desarrolla en los relaves y la licuefacción se presenta cuando la presión de poros inducida se vuelve tan alta que empieza a destruir la estructura de la arena suelta al reducir los esfuerzos efectivos a cero. La presión dinámica de poros es medida y registrada al mismo tiempo que el terremoto y después, cuando se puede alcanzar los valores máximos. La medición de las presiones de poros dinámicas puede ser efectuada con piezómetros de alambre vibratorio debido a que tienen una respuesta lo suficientemente rápida. Cuando el terremoto está sobre un umbral predeterminado dado, el acelerógrafo hace que la computadora tome lecturas más frecuentes en forma consecutiva desde todos los piezómetros. Cuando la presión de poros se empieza a disipar, las mediciones se vuelven menos frecuentes y son finalmente discontinuadas cuando éstas disminuyen a un valor bajo dado. Después de eso, los piezómetros continúan registrando las presiones de poros como antes, una vez cada 1 a 2 semanas, aproximadamente. En las zonas externas de la presa de relaves, la presión de poros dinámica máxima se desarrolla más rápidamente (en varios minutos) y es rápidamente disipada, mientras que en las zonas internas esto ocurre en forma mucho más lenta (hasta varios días).

2.4.3. Movimientos verticales

Los movimientos verticales en los depósitos de relaves son grandes y se deben a la compactación por su propio peso y a la consolidación. Los movimientos externos son medidos por medio de un sistema de control topográfico de puntos de referencia geodésicos, lo suficientemente afuera de la presa para evitar la influencia del peso de la presa, y con un sistema de hitos geodésicos ubicados:

- A lo largo de la cresta de la presa de arranque y sobre sus bermas si es alta
- Sobre las bermas del talud aguas debajo de la parte de relaves de la presa
- A lo largo de la cresta de la presa de relaves terminada
- Sobre la playa de la presa de relaves terminada. Un incremento súbito en los movimientos verticales podría ser una señal de erosión interna de los relaves y de potencial de colapso.

2.4.4. Movimientos horizontales

En las presas de relaves los movimientos horizontales se deben principalmente a la sedimentación no uniforme de las diferentes partes y en menor grado a la presión proveniente del agua retenida. Generalmente son medidos en los mismos puntos geodésicos que son empleados para control topográfico de los movimientos verticales. Se puede efectuar mediciones más exactas cuando los puntos están ubicados en una línea recta y los movimientos son medidos en relación a ello. Si la cresta de la presa y las bermas no están en línea recta, se puede emplear el método trigonométrico que es menos preciso. En este caso los métodos más precisos son la colimación óptica o instrumentos sofisticados con láser. Sin embargo, en las presas de relaves no son necesarios métodos muy exactos para la cresta de presas de arranque. Es difícil predecir exactamente el límite peligroso de los movimientos verticales y horizontales para los numerosos componentes de los depósitos de relaves. Los movimientos fuertes pueden ser inofensivos si están distribuidos sobre un área grande y si sus velocidades disminuyen con el tiempo. Por el contrario, los movimientos leves pueden ser peligrosos si se concentran en un lugar o si sus velocidades se incrementan con el tiempo.

2.4.5. Deposición de relaves

Para que la construcción tenga éxito, se debe controlar cuidadosamente la deposición de los relaves. Se necesita el material más grueso para la construcción de la presa y la mayor densidad que pueda ser obtenida, la mayor resistencia de los relaves depositados y el mayor peso de los relaves almacenados en un volumen dado; una mayor consideración con respecto a la eficiencia de todo el proyecto de disposición. La optimización de la técnica de deposición de relaves es específica para cada presa de relaves e incluso para las diferentes etapas cuando su altura aumenta. Esta depende de las condiciones topográficas particulares, de la distribución del tamaño de grano de los relaves cuando llegan de la planta de procesamiento, así como también de la densidad de pulpa. Es muy difícil especificar de antemano la tecnología de deposición más apropiada, debería revisarse y optimizarse durante el curso del trabajo; el enfoque de “diseño de acuerdo al avance”. Se debe determinar frecuentemente los datos de salida (tamaño de partícula de los relaves iniciales y de la densidad de pulpa) debido a los cambios que generalmente se desarrollan durante

el largo periodo de construcción. Los parámetros tecnológicos que necesitan ser monitoreados son:

- Ancho de la playa
- Descargas desde las salidas de gruesos
- Tamaño de partícula de los relaves y densidad de pulpa desde las primeras y las últimas salidas de descarga de gruesos desde un tubo de distribución principal.

La tecnología de relleno hidráulico determina la zonificación de los relaves depositados de acuerdo con el tamaño de partícula y densidad a lo largo del ancho de la playa (desde el lugar de descarga de gruesos hasta la poza de decantación). Esto es importante para obtener el prisma resistente requerido que forma la presa de relaves, con sus dimensiones de diseño y estabilidad. El control se efectúa tomando muestras para distribución de tamaño de grano y densidad de los relaves depositados a lo largo y a través de la playa. Parte de estas muestras también están sujetas a las pruebas de laboratorio siguientes: resistencia al corte, compresibilidad y consolidación. La relación entre la resistencia al corte, compresibilidad, consolidación, graduación y densidad también se puede obtener de estas pruebas. Esta relación puede permitir que las propiedades mecánicas de los relaves depositados puedan después ser fácilmente determinadas. Uno de los parámetros más importantes para ser monitoreados es el ancho de la playa no sumergida. Una playa suficientemente ancha es el prerrequisito para la favorable zonificación del material con la finalidad de dar el tamaño de partícula, densidad y permeabilidad, de la cual depende la estabilidad de la presa de relaves. La estabilidad también depende directamente del ancho de la playa porque determina la altura de la superficie freática y la consolidación de los relaves. Una de las necesidades de monitoreo más importantes es documentar la geometría interna y la configuración de la presa de relaves, especialmente el ancho de la playa, mediante mediciones topográficas precisas y regulares mientras avanza la construcción y se incrementa la altura. Registros se debería conservar y archivar adecuadamente durante la vida operativa de la mina los registros completos del diseño, construcción y comportamiento de la presa y el vaso de relaves, así como de cualquier evento que afecte o pueda haber afectado la seguridad de la presa de relaves. Estos registros deberían incluir, pero no estar limitados a: documentos de diseño tales como criterios de diseño, datos de entrada, informes sobre exploración

del sitio y pruebas de modelos, cálculos, dibujos y especificaciones; registros de construcción tales como documentación sobre los métodos y materiales de construcción, informes sobre el control de calidad, pruebas de laboratorio e inspección de construcción, observaciones de la performance de las presas de relaves, y un conjunto completo de dibujos de registro de construcción; registros de comportamiento operacional tal como lecturas de instrumentos e interpretaciones relacionadas, informes de inspección, y evaluaciones de seguridad; todo registro sobre alteraciones, ampliaciones y/o trabajo de reparación; e informes sobre eventos inusuales o sucesos relacionados en alguna forma con la seguridad de la presa de relaves. No se debería eliminar ninguno de estos registros mientras la presa o alguna parte de ella permanezca en el lugar.

2.4.6. Recuperación de depósitos

Recuperación en caso de reboce por la cresta

Siempre que el reboce no haya ocasionado una falla catastrófica de la presa, la rehabilitación consistiría esencialmente en reemplazar el material perdido de la cresta y del talud aguas abajo como resultado de la erosión, y en reparar cualquier trabajo auxiliar dañado por el evento. Se debe tener cuidado cuando se efectúa las reparaciones con el fin de seleccionar el material de relleno que tenga propiedades apropiadas, como por ejemplo: densidad, resistencia, permeabilidad y durabilidad, el cual puede ser reemplazado y compactado adecuadamente por los equipos que pueden ser movilizados al sitio de la reparación. Si es necesario, se tendrá que tener en cuenta al uso de medidas especiales tales como gaviones, geomallas o geotextiles para proporcionar la resistencia necesaria a cualquier reboce por la cresta que se realice en el futuro. Además de reparar la presa, es esencial determinar la causa del reboce por la cresta y realizar trabajos para prevenir cualquier recurrencia posible. Dichos trabajos podrían incluir una o más de las siguientes medidas:

- Modificar el método de operar el depósito de modo que haya disponible borde libre adicional de líquido con el fin de soportar los incrementos excepcionales en el nivel del depósito
- Aumentar el nivel de cresta para lograr el mismo efecto
- Aumentar la cresta para subsidencia futura
- Proporcionar mayor capacidad del sistema de decantación o vertedero.

Recuperación en caso de inestabilidad de taludes

Antes de construir las medidas de recuperación de estabilidad permanente, es necesario que se determine las causas de la inestabilidad. A menos que la causa sea evidente, se debería efectuar suficiente investigación para determinar la causa, y si es necesario y adecuado, proporcionar información para el diseño de la recuperación. Sin embargo, puede haber circunstancias, después de producirse una falla, en las que se necesite efectuar cierto trabajo con carácter de urgencia con el fin de resguardar el depósito de otros daños catastróficos posibles, en cuyo caso no habría tiempo para realizar investigaciones detalladas antes de empezar la recuperación o rehabilitación. En caso de reparación permanente o como una medida de emergencia, la recuperación para la estabilización de taludes incluiría normalmente uno o más de las siguientes técnicas:

- Modificación del perfil de la presa
- Instalación de los trabajos de drenaje para disminuir el nivel de la superficie freática tal como drenajes de zanjas profundas sobre el talud aguas abajo, drenajes perforados horizontalmente, drenaje adicional en la base, etc., todos protegidos con filtros adecuadamente diseñados para prevenir la pérdida de relleno
- Instalación de refuerzo del suelo
- Construcción de estructuras de retención, tales como el refuerzo de la base con relleno de roca.

Es importante que se considere cualquier efecto potencialmente desestabilizante ocasionado por las acciones de recuperación. Por ejemplo, las cargas estáticas o dinámicas asociadas con los equipos de construcción tienen un efecto adverso en la estabilidad y se debería efectuar en corto tiempo trabajos de instalación de drenajes o muros de retención que requieren excavación aguas abajo de taludes inestables o potencialmente inestables. Si se considera necesario instalar drenajes perforados, se debería tener mucho cuidado para asegurar que la percolación dentro de los taladros no provoque una falla en las tuberías durante la instalación.

Recuperación en caso de erosión interna

Probablemente sea difícil de detectar la erosión producida por los defectos dentro de la presa tales como el drenaje inadecuado para controlar la percolación, las resquebrajaduras, detalle pobre de conductos a través de la presa o poca protección

del filtro de drenajes. Asimismo, frecuentemente el desarrollo de una falla en las tuberías puede ser tan rápido que no permita implementar medidas de recuperación. Sin embargo, en circunstancias donde es posible la recuperación, el tipo de medida a adoptar dependerá del defecto que debe ser rectificado. En todos los casos la primera acción debería ser, como asunto de urgencia, reducir el nivel de agua o de pulpa retenida en el depósito. Además, si la fuente de la percolación que causa la erosión se puede ubicar sobre la cara aguas arriba, se debería colocar material para producir sellado. Sin embargo, raramente será posible hacer esto ya que el área de entrada de flujo de percolación normalmente será obstruida por los relaves del depósito. Otra recuperación de emergencia necesaria para tratar de prevenir una falla catastrófica sería la rápida colocación de material de drenaje sobre la cara aguas abajo para que actúe como un filtro invertido y de esta manera controle la gradiente de salida de la percolación y reduzca el riesgo de erosión hacia la cabeza. Después de la implementación de las medidas de emergencia, se debería dirigir la atención a la rectificación permanente de los defectos que causan la erosión interna. Ya sea si estos se deben a los defectos de diseño o a la deterioración con el tiempo de las medidas de drenaje existentes, las medidas de recuperación apropiadas pueden incluir inspección, limpieza o reparación de los drenajes existentes o la instalación de uno o más de las siguientes medidas de drenaje. Cada uno debe estar completamente protegido por un sistema de filtro correctamente diseñado para prevenir la erosión interna:

• Drenajes mediante zanjas profundas en el talud aguas abajo de la presa.
• Drenajes sub-horizontales perforados.
• Drenaje en la base.
• Drenaje mediante colchón de barro e incremento de peso en la cara aguas abajo.
• Pozos de alivio de presión.
• Tubos con el extremo final perforado como alternativa, o adicionalmente, se debería considerar la colocación de una berma en la base con drenaje libre o con un apropiado drenaje subterráneo, o la instalación de una zanja de barro o muro de diafragma en el cuerpo de la presa.

Recuperación en caso de erosión externa

Se puede prevenir la erosión externa debido a la acción del viento y a los efectos de precipitación ya sea cubriendo la superficie expuesta con un material más grueso, no

degradable, o mediante estabilización química o con el empleo de vegetación. Puede ser una opción adecuada el colocar un colchón de material relativamente grueso si el material apropiado está disponible localmente a un costo económico. La estabilización química ha sido empleada para el control temporal de erosión de relaves, pero puede ser relativamente costoso y proporcionar una solución menos permanente. La construcción de bermas sobre las caras aguas abajo de las presas de relaves es útil para controlar la erosión de percolación. Generalmente deberían estar espaciados en una altura vertical no mayor de 10 m y debería ser lo suficientemente ancho para permitir el acceso para mantenimiento. Se debería construir drenajes de bermas necesarios para recolectar y canalizar el agua superficial. Para depósitos afectados por erosión en la base como resultado de la avenida por corrientes de agua cercanas, la recuperación consiste en reemplazar el material erosionado y proteger el talud de otros peligros, por ejemplo mediante el uso del enrocado.

Recuperación en caso de daños por terremotos

Los daños típicos de las presas de relaves ocasionados por terremotos consisten en la sedimentación y el desplazamiento lateral con resquebrajaduras relacionadas, particularmente en la dirección longitudinal, es decir paralela a la cresta. También pueden verse afectados los trabajos estructurales y las medidas de drenaje. Las medidas de recuperación requeridas por los daños ocasionados por el terremoto dependerán del tipo y alcance del daño sufrido y se debería efectuar una inspección detallada. Además, puede ser apropiado revisar el diseño general del depósito y efectuar trabajos para asegurar que funcionará adecuadamente durante y después de cualquier evento de terremoto futuro.

2.5. Cierre de depósitos de desechos

“Los costos de cierre y recuperación para represas de relaves varían generalmente de $ 2,000 a $ 12,000 por hectárea. Por lo tanto, para muchas represas más grandes, la recuperación puede costar de $ 1 millón a $10 millones aproximadamente, una suma de por sí considerable. Además, como resultado de la conducta un tanto irresponsable en muchas de las operaciones mineras pasadas con respecto a la recuperación, es comprensible que muchas autoridades gubernamentales requieran generalmente que el operador de la mina entregue un bono de recuperación para asegurar que los esfuerzos de recuperación planificados se efectúen realmente después del abandono de la mina. Los costos de los bonos son proporcionales a los

costos estimados de la recuperación real y los incrementan. Desde el punto de vista de las consecuencias económicas, es importante que se entienda bien los propósitos del cierre y de la recuperación" (Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina – MINEM Rennat, 1997). La diferencia principal de estabilidad entre los casos de operación y los de abandono radica en las condiciones freáticas. Generalmente cuando cesa la descarga y la poza de decantación ya no proporciona una fuente continua de agua, la superficie freática dentro del depósito disminuye dramáticamente, originando mayor estabilidad del talud del depósito después de la recuperación que durante la operación. En consecuencia, hay menos preocupación por la estabilidad de masa de los taludes del depósito después del abandono: cualquier talud de depósito de relaves que era estable durante la operación mantendrá su integridad general después que terminen las operaciones. Esto asume, por supuesto, que se tomará medidas efectivas durante la recuperación para prevenir la acumulación de agua en el depósito como se mencionó anteriormente.

2.6. Estabilidad de la presa de relaves

Estabilidad sísmica

Durante la operación de la presa, la licuefacción de los relaves sueltos depositados en áreas altamente sísmicas puede aumentar el espectro de deslizamientos de tipo de flujo masivo durante los terremotos, tal como se mencionó previamente. Sin embargo, la falta de saturación esperada después del abandono y de la recuperación generalmente evita la licuefacción, incluso bajo mayores impactos sísmicos. Por lo tanto, la estabilidad sísmica de los depósitos de relaves abandonados está generalmente asegurada.

Estabilidad hidrológica

Desde el punto de vista hidrológico, las fallas inducidas constituyen la causa principal de la inestabilidad de masas de depósitos de relaves abandonados. La acumulación de escorrentía de agua en un depósito, además de aumentar la posibilidad de inestabilidad de talud o sísmica, puede causar una falla directa del depósito debido al reboce por la cresta o a la erosión en la base del depósito. A pesar de que la estabilidad hidrológica es un factor importante en el diseño de un depósito estable durante la operación, no es necesariamente el caso que un depósito que está seguro desde un punto de vista hidrológico durante la operación permanecerá de esa manera

después del abandono y la recuperación. Un factor importante en el planeamiento hidrológico es la selección de la avenida de diseño apropiada, y los métodos de periodo de retorno frecuentemente proporcionan una base aceptable para el diseño durante el tiempo de vida operativo de la represa.

Estabilidad contra la erosión a largo plazo

Un propósito adicional y esencial de la recuperación es prevenir la erosión a largo plazo por aire o agua del depósito abandonado. Los relaves son notablemente propensos a formar quebradas debido a la erosión por escorrentía del agua, y sólo se necesita considerar la semejanza entre los relaves y las arenas que incluyen dunas migratorias para darse cuenta de la necesidad de protección contra la erosión por el viento. Mientras la erosión por el viento es principalmente un factor en superficies planas y no accidentadas, la erosión por el agua es más frecuentemente un problema en los taludes de depósitos. A pesar de que no hay disponibles métodos analíticos adecuados para la modelación del potencial de erosión de agua como una función de lo empinado del talud del depósito, la experiencia indica que los taludes de depósitos de relaves de menor pendiente que 3:1 se requiere generalmente para una resistencia razonable a la erosión y el establecimiento de vegetación. A veces se prefiere los taludes de menor pendiente que 5:1.

2.7. Contaminación Ambiental

Mientras la percolación generalmente disminuye y eventualmente cesa después del término de la descarga de relaves activos, en algunos casos puede ser necesario tomar precauciones especiales relacionadas con la recuperación. En particular, la oxidación de la pirita aumenta considerablemente en la zona no saturada. Por este motivo, ya que la superficie freática disminuye en una represa abandonada, la oxidación de piritas, si es que existen en los relaves, se acelerará en gran medida, produciendo pH reducido y liberación incrementada de contaminantes metálicos. Estos contaminantes producidos por la oxidación, potencialmente mucho más nocivos que los presentes durante la operación de la represa, pueden ser lixiviados dentro del agua subterránea por infiltración de precipitación sobre la superficie de la represa. Para prevenir la lixiviación de contaminantes en tales casos, frecuentemente se requiere una cubierta de arcilla sobre la superficie de la represa en abandono y recuperación, junto con la nivelación para prevenir el empozamiento de la escorrentía. En el caso particular de los relaves ricos en pirita, se debería considerar la opción de

mantener condiciones saturadas en el depósito después del abandono para prevenir la oxidación a largo plazo. La vegetación es la más común y generalmente la opción de estabilización preferida para depósitos de relaves. Si se puede establecer una cubierta vegetativa que se perpetúe por sí sola, no sólo se puede minimizar la erosión por agua y viento, sino también se puede hacer que el depósito vuelva a tener cierta semejanza con su apariencia original y al uso de tierra. “En climas favorables y para relaves de composición química favorable, la revegetación puede necesitar sólo poco esfuerzo o puede ocurrir por procesos naturales durante un periodo de tiempo razonablemente corto. Sin embargo, en climas áridos o para relaves que tienen bajo pH, o altas concentraciones de metales pesados o sales, el establecimiento de vegetación puede ser un proceso largo, difícil y costoso. A pesar de que la revegetación ha sido planeada para muchos depósitos actualmente activos, se ha llevado a cabo relativamente pocos programas de recuperación de relaves con un término exitoso”. (Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina – MINEM Rennat, 1997)

CAPÍTULO III
METODOLOGIA

3.1. Alcances

La elaboración del presente trabajo requiere el uso de estrategias de gestión de riesgos, en minería tienen o pueden tener diferentes niveles de alcances, una parte de las estrategias se orientan a minimizar el riesgo de un proceso o una tarea, haciendo que sea ejecutado sin la adecuada comprensión de los peligros, los eventos indeseados potenciales y sin tener los controles requeridos.

La metodología BowTie utilizada ayudó a analizar y consultar en mayor profundidad el evento no deseado especifico: *pérdida de contención del dique principal de la presa de relaves*, que se identificó en la evaluación de riesgos, se consiguió el objetivo principal que es evaluar la adecuación, efectividad e idoneidad de los controles aplicados sobre las posibles causas y consecuencias del evento top en las personas, las instalaciones y el entorno.

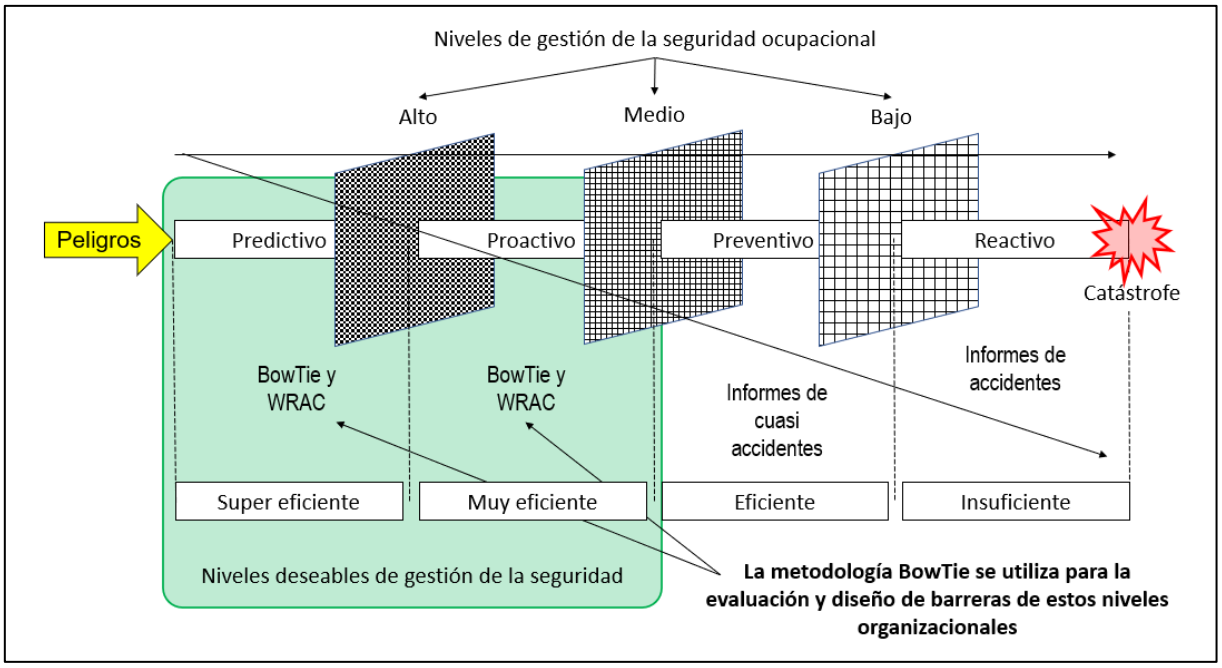


Figura 3.1 Gestion del riesgo operacional y su relación con BowTie

WRAC: Work Risk Assessment and Control

(Evaluación y control de riesgos laborales)

¿Qué es y para que se utiliza la metodología BowTie?

Es una técnica flexible y de fácil uso ya que es mas básica que el Análisis de Arboles de Falla y del Análisis de Arboles de eventos. Se utiliza para analizar y consultar en mayor profundidad un evento no deseado especifico que pueda haberse identificado en una evaluación de riesgos. El objetivo principal es evaluar la adecuación, efectividad e idoneidad de los controles aplicados sobre las posibles causas y consecuencias del evento en las personas, las instalaciones o el entorno. El método incluye una planilla o a veces un diagrama que es una representación de las relaciones entre todos los factores para un escenario de riesgo elevado. El esquema o planilla muestra las relaciones entre peligros, amenazas, controles, medidas de recuperación y consecuencias. El análisis del método se usa para demostrar que controles actuales son adecuados, están operativos para la gestión de los peligros. También determinar si los controles actuales son inadecuados o insuficientes para asegurar un control eficaz de las amenazas y riesgos mayores.

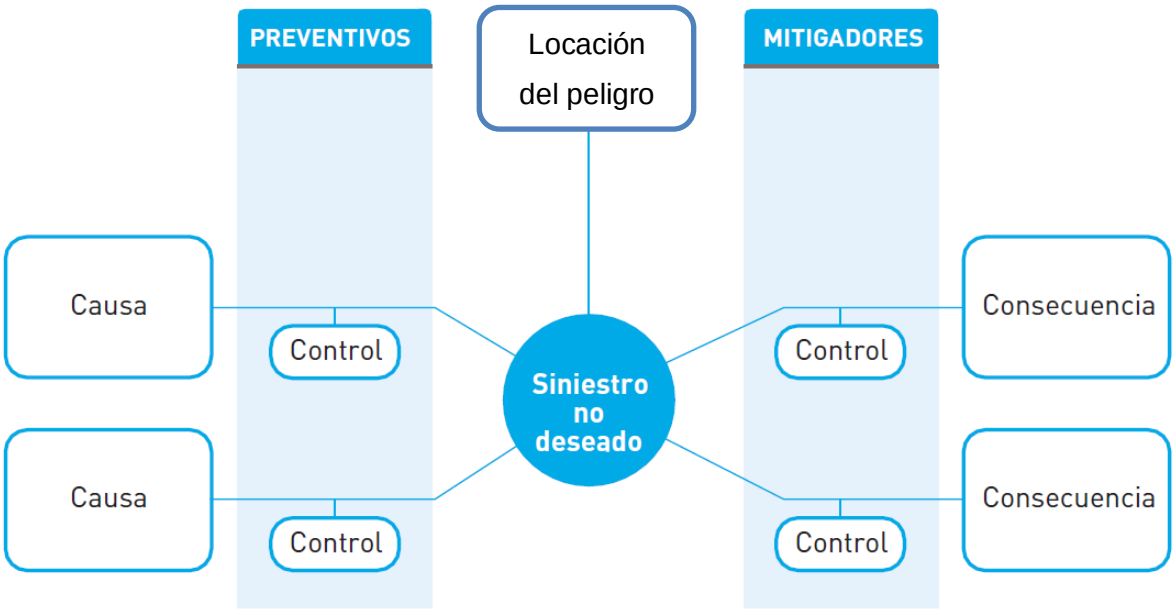


Figura 3.2. Diagrama BowTie - controles preventivos y mitigadores

Fuente: Adaptado de *Health and Safety Critical Control Management: Good practice guide,* [Figure 3 *Bowtie diagram indicating preventative and mitigating controls*] (p.11) *(2019)* International Council on Mining and Metals

Available from https://www.icmm.com

Consideraciones para realizar un BowTie

La metodología BowTie debería ser ejecutada por un grupo multidisciplinario que tenga un nivel apropiado de comprensión práctica de las causas y consecuencias de los eventos relevantes. También debe considerarse la inclusión de experiencia externa para asegurar un balance adecuado con respecto del análisis de riesgos del grupo, se aconseja designar un facilitador competente y se debe seleccionar un líder para conducir al equipo. El BowTie se usa normalmente con procesos previos de análisis que se ha realizado de forma exhaustiva y prolija, como cualquier metodología puede ser usada de diferentes maneras entre las cuales se menciona las siguientes:

Diseño de controles ante peligros y amenazas. Sus entradas son exactamente peligros, amenazas y factores causales y sus salidas son controles eficaces.

Diseño de controles para desempeño libre de errores, sus entradas son errores y fallas de los controles existentes y se determinan niveles de diseño para eliminar al máximo los errores.

3.2. Procedimiento

El grupo multidisciplinario liderado por uno de sus miembros realizan los siguientes pasos:

3.2.1. Definir las fuentes de riesgo (peligros)

La fuente de riesgo de un elemento que por si solo o por combinación con otros, presenta el potencial intrínseco de dar lugar a un riesgo. La fuente de riesgo puede ser tangible o intangible, en el contexto de seguridad, fuente de riesgo se refiere a un peligro. Se selecciona un ítem de las instalaciones donde se realizan operaciones o actividades como, por ejemplo:

- Mina
- Túnel
- Taller de mantenimiento
- Depósito de relaves
- Subestación eléctrica principal
- Planta de beneficio
- Almacenamiento de cianuro

Se realiza una lista de peligros asociados a la selección anterior como, por ejemplo:

- Alta temperatura
- Alta presión
- Electricidad
- Operaciones con vehículos pesados
- Tormenta eléctrica
- Cianuro
- Explosivos

3.2.2. Definir sucesos o eventos top

Un suceso es la ocurrencia o cambio de un conjunto particular de circunstancias, el suceso puede ser cierto o incierto, el suceso puede tener una sola ocurrencia o una serie de ocurrencias. Puede calcularse la probabilidad asociada al suceso para un cierto periodo de tiempo.

Un evento puede ser único o repetirse y puede tener varias causas, un evento puede consistir en algo que no se llega a producir; un evento, a veces, es referido como un “incidente” o un “accidente”. Un evento sin consecuencias también puede calificar como “cuasi accidente”.

Un suceso o evento no deseado es aquel que no se desea que ocurra, ya que puede gatillar la materialización de la fuente del riesgo (peligro en caso de seguridad), en el riesgo con un determinado nivel de consecuencia.

Los eventos prioritarios no deseados o “eventos top” son aquellos eventos que por su nivel de magnitud de riesgo requieren medidas de control con un alto nivel de efectividad, estableciéndose controles preventivos y controles de mitigación o de recuperación operacional, los siguientes son ejemplos de eventos no deseados:

- Falla estructural de la presa de un depósito de relaves.
- Pérdida de control de un vehículo de transporte de personas.
- Aumento de la concentración de gases tóxicos por encima de los niveles máximos permisibles.
- Contacto con una fuente de energía eléctrica.
- Pérdida de control de maniobras de izaje.
- Derrame de cianuro en un cuerpo receptor de agua.
- Inicio de fuego en subestación eléctrica principal.

Este es el momento en que se pierde el control sobre el peligro. No hay daño o impacto negativo aún, pero es inminente, esto significa que el top evento ocurre solo antes que inicien los futuros eventos que causarán daño real. La formulación del evento top debe dar respuesta a la pregunta ¿cuál es el momento exacto en que se pierde el control? Para definir un evento top siempre se podrá empezar con una descripción genérica de pérdida de control y enseguida especificarla con mayor detalle en caso sea necesario. El evento top debe ser un escenario especifico en consideración a la ubicación.

3.2.3. Identificar amenazas (causas)

Es un proceso de búsqueda, reconocimiento y descripción de causas; la identificación de las amenazas implica la identificación de fuentes de riesgo, puede implicar datos históricos, análisis teóricos, opiniones informadas y de expertos y las necesidades de las partes interesadas. Los siguientes son ejemplos de amenazas:

- Persona no competente para el cargo permanente de supervisor de los componentes de un depósito de relaves (ingeniero especializado y con experiencia en geotecnia).
- Falta de mantenimiento preventivo de transformadores de la subestación eléctrica principal.
- Inoperatividad de la instrumentación geotécnica para medir el nivel freático.
- Excesiva temperatura (mayor a punto de inflamación del aceite aislante) por sobre carga del transformador.
- Almacenamiento de explosivos y accesorios de voladura en un mismo polvorín.
- Baja cobertura de aire fresco en labores de explotación minera subterránea.
- Diseño de minado sin rampas de alivio o emergencia en vías principales de explotación minera superficial.

Las amenazas son las causantes de la ocurrencia del evento top y puede haber múltiples amenazas. Se debe evitar las formulaciones genéricas como "error humano", "falla del equipo" o "condiciones climáticas". Las amenazas responden a la pregunta ¿qué contribuye a la ocurrencia de un evento top?

3.2.4. Identificar medidas de control (barreras)

Son las medidas que modifican al riesgo, los controles incluyen procesos, políticas, dispositivos, practicas u otras acciones que modifican al riesgo. Los controles no siempre pueden ejercer el efecto modificador previsto o asumido. Los siguientes son ejemplos de medidas de control:

- Utilización de drones para la supervisión de los componentes del depósito de relaves (levantamientos topográficos y ortofotos)
- Monitoreo satelital de velocidades de vehículos que transportan personas.
- Monitoreo de taludes con radares para el control de riesgos geotécnicos en explotación minera superficial.
- Plan y cumplimiento del mantenimiento óptimo de instalaciones eléctricas.
- Monitoreo diario de emisiones de los escapes de equipos con motores diesel en la explotación minera subterránea.
- Instalación de ventiladores extractores principales.

Las barreras interrumpen el escenario para que las amenazas no den lugar a una pérdida de control (el evento top) o no se conviertan en un impacto real (las consecuencias). Hay diferentes tipos de barreras, que son principalmente una combinación de la conducta humana y la tecnología.

Debe definirse para cada control o barrera identificado: su jerarquía y efectividad, su descripción, su tipo, su calidad y criticidad, se le debe asignar un dueño quien es responsable de su funcionamiento.

Reglas de validación para las barreras:

Se considera una barrera **efectiva** aquella que funciona como está considerado.

Se considera una barrera **independiente** de otra, si no tiene una causa común de falla. Se considera una barrera **auditable** si puede ser evaluada para asegurar que puede operar correctamente cuando es requerida. La barrera debe ser lo suficientemente especifica que su función puede ser definida y su rendimiento puede ser verificado.

3.2.5. Identificar consecuencias

La consecuencia es el resultado de un evento top que afecta un objetivo, un evento puede conducir a una serie de consecuencias, una consecuencia puede ser cierta o incierta y puede tener efectos positivos o negativos sobre los objetivos, las

consecuencias se pueden expresar de forma cualitativa o cuantitativa, las consecuencias iniciales se pueden convertir en reacciones en cadena. Los siguientes son ejemplos de consecuencias:

- Volcadura de vehículo de transporte de personas.
- Derrame de relaves al río.
- Incendio en los tanques de combustible a granel para el abastecimiento de equipos.
- Intoxicación con gases.
- Formación de aguas acidas.
- Derrame de hidrocarburos a la laguna de donde consume agua la comunidad.
- Formación de nubes toxicas.
- Derrumbe de excavaciones subterráneas.
- Deslizamiento de talud en zona de rampa principal en una explotación minera superficial.
- Bloqueo de vías de transporte por personas miembros de la comunidad.

Al igual que con las amenazas, se tiende a centrarse en las categorías genéricas en lugar de describir los acontecimientos específicos; los siguientes son ejemplos de categorías amplias de consecuencias:

- Daño económico (pérdida del equipo / interrupción de la producción).
- Penalidades, contingencias legales.
- Lesiones graves o la muerte de trabajadores.

Las consecuencias son los eventos o cadenas de eventos que resultan de la liberación de un peligro.

3.2.6. Identificar las medidas de recuperación

Luego de identificar los escenarios no deseados o consecuencias, es el momento de buscar la forma de mitigarlos, esto se hace utilizando medidas de recuperación que son todas las medidas técnicas, operacionales y organizacionales que limitan la cadena de consecuencias derivadas del evento top. Los siguientes son ejemplos de medidas de recuperación:

- Contención del relave liberado.
- Sistemas para detectar gas, fuego, humo.

- Equipo de respiración autocontenido (ERA) para atmosferas pobres en oxigeno
- Sistemas operacionales para la gestión de emergencias (planes de contingencia, simulacros, entrenamiento y ejercicios)
- Medidas de limpieza y restauración del paisaje.
- Primeros auxilios y tratamiento en hospital.
- Sistema de comunicación con fuentes de energía independientes.
- Sistema de extinción de incendios para vehículos
- Vehículos para traslado de personas (ambulancias, helicóptero)

Las consecuencias representan un peor escenario si no hay barreras de mitigación. Las barreras no son perfectas. Incluso la mejor barrera puede fallar; se necesita saber por qué una barrera fallará. Esto se hace usando el factor de escalamiento.

Factores de escalamiento

Son condiciones que llevan a incrementar el riesgo debido a la pérdida o evasión de las barreras o de la preparación de las medidas de recuperación. Algo que pueda hacer que una barrera falle es como se puede describir un factor de escalamiento. Un ejemplo de factor de escalamiento sería el siguiente: un sistema de control eléctrico que funciona con electricidad podría fallar si hay una falta de alimentación de energía eléctrica.

Control de factores de escalamiento

Son controles implementados para gestionar las condiciones que llevan a incrementar el riesgo debido a la pérdida de barreras o pérdida de medidas de recuperación.

Finalmente se debe identificar cuáles son controles críticos, los que se definen como aquellos que, si son retirados, influenciarán significativamente en el riesgo (en ausencia de todos los controles es el único que podría tener la mayor influencia en el riesgo). Un control critico posee un alto nivel en la jerarquía de controles y alta calidad.

Los siguientes diagramas de flujo son utilizados en la metodología BowTie como criterios para definir si una medida es un control y cuando un control es crítico.

Figura 3.3. Criterio para definir si una medida es un control

Fuente: Tomado de *Health and Safety Critical Control Management: Good practice guide,* [Figure 2 *Control identification decision tree*] (p.11) *(2019)*

International Council on Mining and Metals

Available from https://www.icmm.com

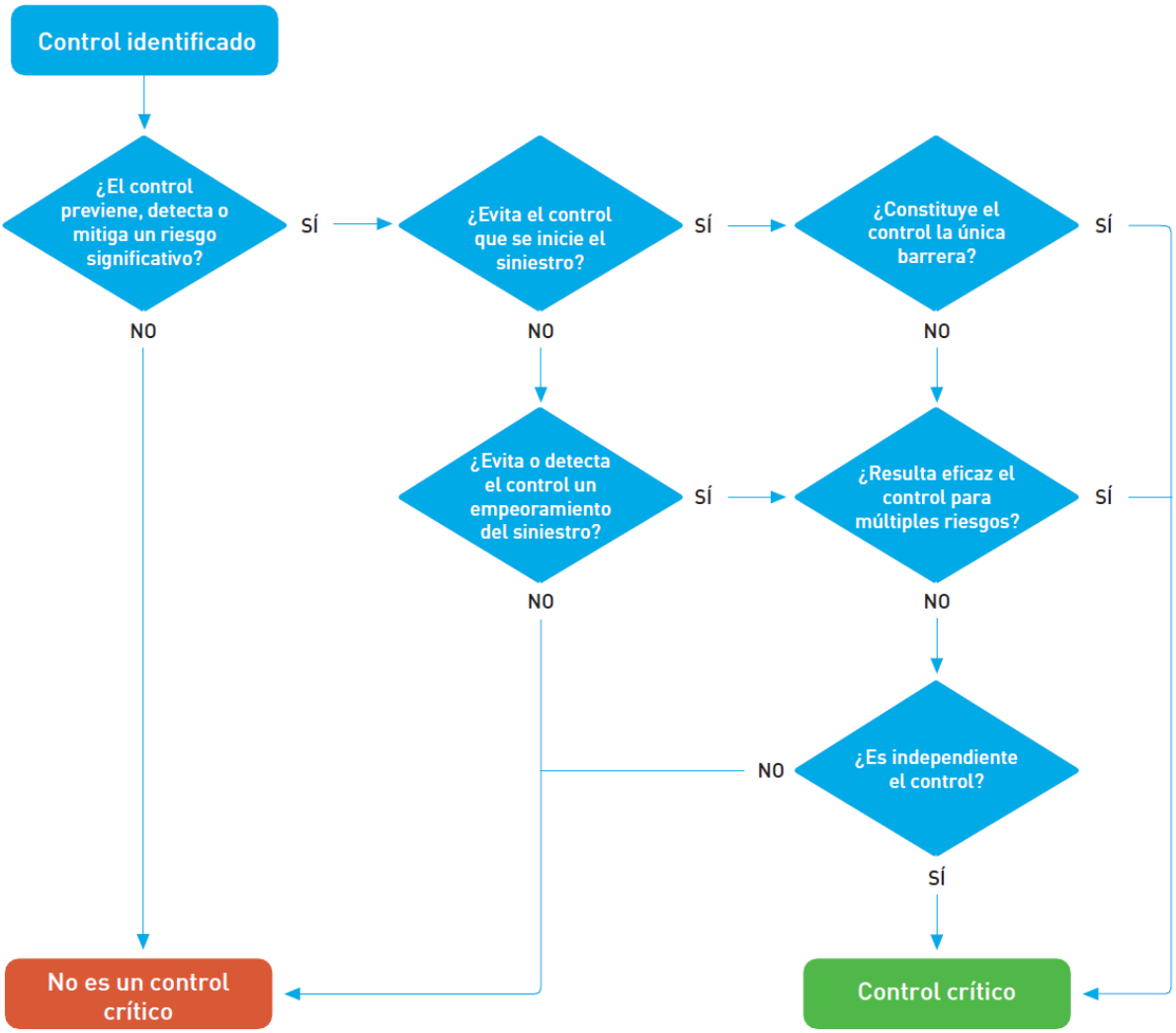


Figura 3.4. Criterio para definir si un control es crítico

Fuente: Tomado de *Health and Safety Critical Control Management: Good practice guide,* [Figure 4 *BHP Billinton critical control decision tree*] (p.13) *(2019)* International Council on Mining and Metals Available from https://www.icmm.com

CAPÍTULO IV
MEJORA DEL MODELO DE GESTIÓN

Yauliyacu es un yacimiento de metales base en los Andes del Centro del Perú, en la actualidad la producción promedio anual es de 1 300 000 TM de mineral polimetálico zinc, plomo, plata y cobre.

La mineralización se encuentra en cuerpos y vetas, siendo los cuerpos principales el cuerpo M, el cuerpo L y el cuerpo 242M; las vetas principales son la veta M, la veta C y la veta Rayo. Las reservas minables son de 965 000 TM y las reservas probables de 2 443 000 TM, con un contenido promedio de 2.18% de zinc,0.97% de plomo, 0.21% de cobre y 3.48 oz/ton de plata. Los relaves producto del proceso de concentración son transportados por un sistema de bombeo de relaves constituido por dos bombas Wirth (con capacidad de bombeo de 80 m^3/hora cada una de ellas) y una bomba Wilson Snyder como reserva, que impulsan el relave a través de tubería de acero hasta la presa de relaves de Chinchan.

4.1. Ubicación

4.1.1. Ubicación política

Yauliyacu se encuentra ubicada en el distrito de Chicla, provincia de Huarochiri, departamento de Lima, las operaciones de mina se realizan a una altura comprendida entre los 4,200 msnm hasta los 5,000 msnm.

Departamento	:	Lima
Provincia	:	Huarochiri
Distrito	:	Chicla

4.1.2. Ubicación en coordenadas UTM*

El Perú para sus concesiones mineras utiliza la proyección UTM teniendo como base el WGS 84.♦

El área de las operaciones de Yauliyacu se ubica dentro de las siguientes coordenadas UTM:

	Coordenada NORTE	Coordenada ESTE
MAX	8712000	368000
MIN	8719500	364000

4.1.3. Ubicación en coordenadas geográficas

La coordenadas geográficas o angulares son utilizadas tradicionalmente, están referidas al ecuador (en dirección norte o sur) y al meridiano de Grenwich (en dirección este u oeste).

El área de las operaciones de Yauliyacu se ubica dentro de las siguientes coordenadas geográficas:

	Latitud SUR	Longitud Oeste
MAX	11° 38' 47.45"	76° 14' 04.76"
MIN	11° 34' 46.46"	76° 12' 53.03"

4.1.4. Ubicación en la carta nacional (IGN)

Yauliyacu se ubica en la hoja de nombre Matucana el número de referencia asignado a la hoja es 24-k.

Por definición cada zona UTM tiene como limites dos meridianos separados 6°, la hoja Matucana se ubica en la zona 18.

Cada zona UTM está dividida en 20 bandas codificadas desde la C a la W, tienen una altura de 8° cada una, la hoja Matucana se ubica en la banda L.

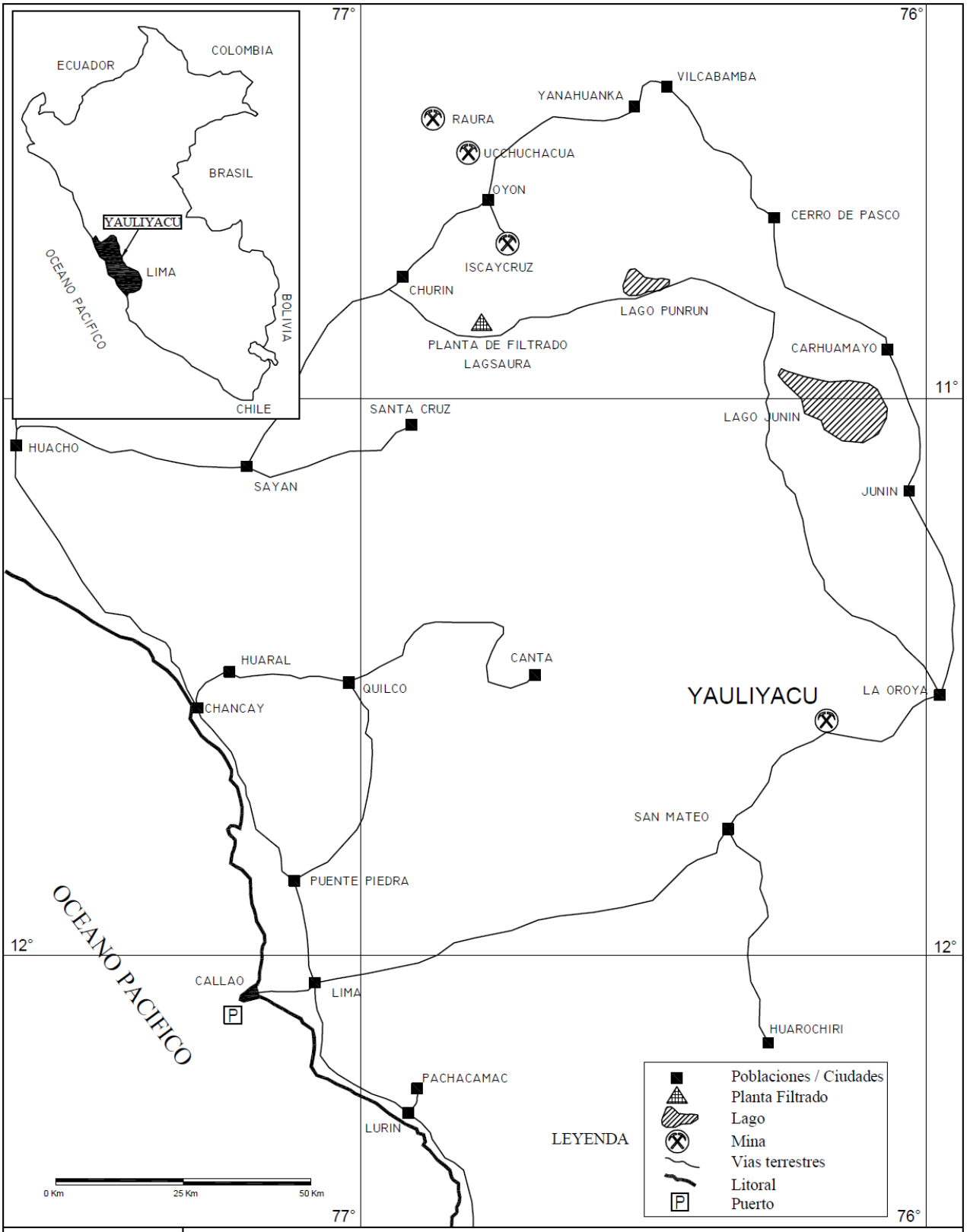
4.1.5. Accesibilidad

El acceso a la mina es: Lima - San Mateo – Casapalca – Mina, con 120 km. con un tiempo de viaje de 3.5 horas.

---

* Las coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator) son una proyección del sistema de coordenadas planas.

♦ World Geodetic System del año 1984.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN DE AREQUIPA

FACULTAD DE GEOLOGIA GEOFISICA Y MINAS

SECCION DE POSGRADO

PLANO DE UBICACION

LAMINA N°

01

DIBUJO: C.F.A.Q.	REVISADO: C.F.A.Q.
FECHA: SETIEMBRE - 2021	ESCALA: GRAFICA

4.2. Modelo de gestión de las instalaciones de relaves

Este documento puede ayudar a las compañías a cumplir con los reglamentos del gobierno y la política corporativa, así como ayudar a las compañías a desarrollar sistemas de gestión de relaves que incluyan criterios medioambientales y de seguridad.

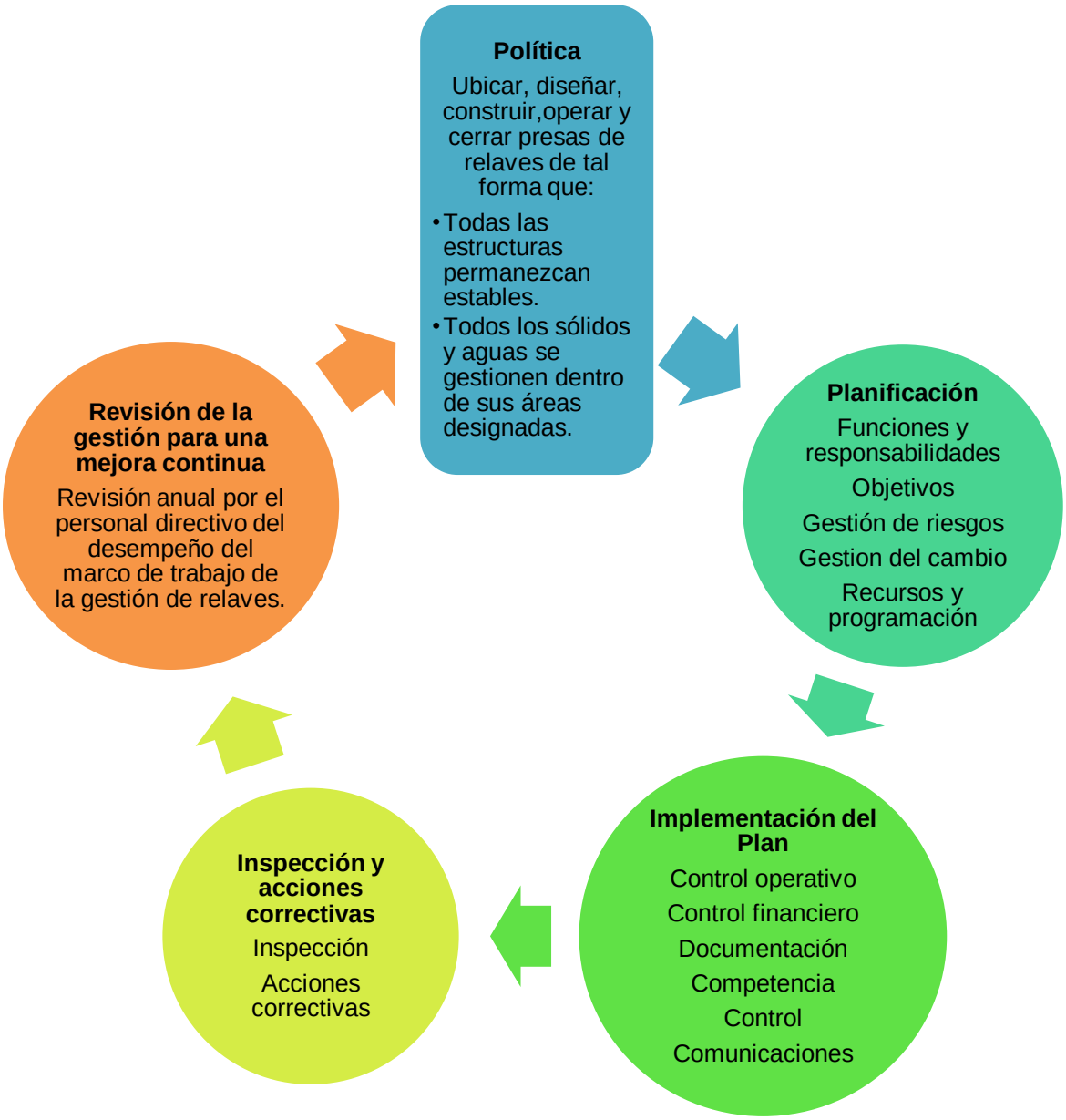


Figura 4.1 Elementos del modelo de gestión de presas de relave

Fuente: Adaptado de *Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities,* [Figura 1 *Elements of the*

Tailings Management Framework] (p.2) *Second Edition (2019)* The Mining Association of Canada
Available from https://www.mining.ca

La Figura 06 muestra la integración de las consideraciones ambientales y de seguridad en cada etapa del ciclo de vida de una instalación de relaves, desde la selección y el diseño inicial del emplazamiento, a través de la construcción y la operación, hasta la posible clausura y cierre definitivo.
Los requisitos legales establecen normas mínimas para la seguridad y el desempeño ecológico de instalaciones de gestión de relaves.

Principios de gestión:
Se requiere que las instalaciones de relaves se diseñen, se ubiquen, se construyan, operen y se cierren de manera que:

- Todas las estructuras sean estables
- Todos los sólidos y las aguas se gestionen dentro de las áreas designadas según el diseño
- Todas las estructuras cumplan con las normas de la empresa, la política medioambiental, los requisitos reglamentarios y con los compromisos con las partes interesadas.

La organización debe establecer uno o más procedimientos para implementar, controlar y actualizar el presente modelo.

El objetivo:
El objetivo del modelo de gestión de presas de relave incluye establecer:

- Las funciones y responsabilidades del personal asignado a la instalación
- Los procedimientos y procesos para gestionar el cambio
- Los componentes clave de la instalación
- Los procedimientos necesarios para operar una instalación, controlar su rendimiento y mantenerla a fin de asegurarse que funciona de acuerdo con su diseño, que cumple las obligaciones reglamentarias y de política corporativa, y que se vincula a la planificación y reacción en caso de emergencia

■ Los requisitos para el análisis y la documentación del rendimiento de la instalación.

El modelo de gestión debe presentar la información de una manera clara, lógica y fácil de usar. Debe indicar claramente cualquier documentación de referencia. El lector debe poder determinar fácilmente qué se requiere y cómo acceder a la información necesaria.

El modelo de gestión debe permitir que se compare el rendimiento de una instalación con las expectativas, los criterios de diseño y los propósitos operativos, en particular en caso de incidentes importantes.

4.2.1. Funciones y responsabilidades:

Identificar a las personas responsables de las operaciones, el mantenimiento, la vigilancia o la preparación y respuesta en caso de emergencias de las instalaciones. Hacer una lista de todos (incluyendo al asesor externo y a los prestadores de servicios) incluyendo el nombre, puesto que ocupa en la organización, papeles que desempeñan, responsabilidades e información contacto. El siguiente cuadro es utilizado para la identificación de personas responsables:

Personal	Operación	Mantenimiento	Vigilancia	Planeación de emergencias
Gerente general de mina/planta				
Supervisores de área de relaves				
Ingenieros y técnicos de relaves				
Ingenieros y coordinadores medioambientales				
Personal responsable de inspecciones de la instalación				
Topógrafos - Personal responsable del levantamiento de presas				
Operadores y supervisores del área de relaves				
Operadores y supervisores del área de gestión/tratamiento del agua				
Supervisores de planta (que se ocupan de los requisitos de descarga de relaves y reciclaje de agua)				
Operadores de planta de relleno de relaves				
Personal de emergencia/seguridad del emplazamiento				
Asesores/consultores externos				
Supervisores mecánicos/eléctricos				
Electricistas				
Mecánicos				
Operadores de maquinaria pesada				
Apoyo administrativo				
Personal de enlace externo/relaciones públicas				
Personal de asuntos legales jurídicos y reglamentarios				
Ingeniero(s) de registro				

Tabla 4.1 Funciones y responsabilidades

Proporcionar organigramas que muestren los vínculos jerárquicos dentro de la organización y los vínculos de comunicación con organizaciones externas.

Es esencial para la integridad de las operaciones que se definan claramente la estructura de gestión de la instalación y las funciones, responsabilidades y competencias necesarias particulares del personal.

El personal tiene que entender los factores que constituyen el rendimiento sólido de una instalación de gestión de relaves, cómo las desviaciones del rendimiento previsto pueden indicar problemas que se están generando.

Un nuevo miembro del equipo debería poder comprender perfectamente la gestión, organización y estructuras de presentación de informes de la instalación y poder ponerse en contacto con el personal directivo apropiado utilizando la información provista.

4.2.1.1. Competencia y capacitación

Establecer requisitos mínimos de conocimientos y competencia para cada puesto con responsabilidades definidas.

Definir los procedimientos para asegurar que se proporcione la capacitación apropiada a todo el personal que trabaje en la instalación, incluyendo los contratistas y proveedores, y que todo el personal entienda bien el modelo de gestión y sus respectivas funciones y responsabilidades. Destacar la responsabilidad de todo el personal del emplazamiento de ser continuamente conscientes de las indicaciones visuales del rendimiento de la instalación.

4.2.1.2. Gestión del cambio

Definir los procedimientos para realizar modificaciones a los planes de diseño u operaciones, como dónde difiere del diseño las condiciones encontradas en el campo. Asegurar que el proceso de cambiar el diseño incluye obtener la autorización para realizar las modificaciones.

Determinar la responsabilidad para examinar, actualizar y mejorar el modelo de gestión, a fin de responder a lo siguiente:

- La evolución del diseño a través de los cambios de capacidad, eficiencias de operación, requisitos de cierre, reacciones sobre el desempeño y cambios del ciclo de vida
- La incorporación de documentos según construcción

■ La variación del rendimiento con respecto al diseño

■ Los cambios en la organización de la gestión del emplazamiento, descripción de la instalación, funciones y responsabilidades, y procedimientos de operación y presentación de informes

■ Las sugerencias para mejorar

■ Planificación/capacitación de sucesión

■ Cambio reglamentario.

4.2.2. Descripción de la instalación

Debe proporcionarse información esencial sobre la instalación – condiciones del emplazamiento y componentes de la instalación, requisitos reglamentarios, motivo y criterios de diseño, historial de construcción, y ubicación de toda la documentación pertinente. La descripción de la instalación puede presentarse en forma de resumen con referencia a información más detallada en documentos e informes justificativos.

4.2.2.1. Perspectiva general de la instalación

Proporcionar una perspectiva general de la instalación, estableciendo el contexto de su entorno, operaciones relacionadas y su historial.

- Propiedad – actual e histórica
- Ubicación
- Plan de distribución del emplazamiento, en el que se muestren los principales componentes y aparatos de la instalación de gestión de relaves o de recursos hídricos, la mina, la planta, características de drenaje y carreteras de acceso
- El contexto del emplazamiento más amplio, incluyendo
  - ■ Las operaciones y el proceso de la mina, la planta
  - ■ Tipo de mineral
  - ■ Producción de relaves
  - ■ Historial – cambios al tipo de mineral, la minería, y procesamiento del mineral
- Características dentro del área del emplazamiento, tal como topografía, arroyos, corrientes de agua, ríos, lagos, vías, zanjas, corredores de conductos y corredores de servicios que no forman parte de la instalación misma
- Historial del diseño, construcción y operación, hitos clave y cambios importantes.

4.2.2.2. Condiciones del emplazamiento

Describir las condiciones del emplazamiento físico que proporcionan la base para el diseño y operación de la instalación. Puede obtenerse amplia información sobre las condiciones del emplazamiento, cuyos elementos esenciales deben resumirse, con referencia a documentos justificativos para detalles adicionales.

- Clima – temperatura, viento, precipitación, evaporación, fenómenos estacionales y extremos, precipitación y escurrimiento, calidad del aire
- Agua
  - ■ Hidrología – en la región: los arroyos, riachuelos, ríos, lagunas y lagos; las condiciones marítimas; la cuenca; las áreas de río abajo que pueden verse afectadas; y la corriente, volumen, química/calidad, y biología del agua
  - ■ Hidrogeología – acuíferos, y corriente, volumen, dirección y química/calidad del agua
- Formas del terreno – topografía, incluyendo ciénagas, taludes
- Geología y geoquímica – características de los depósitos superficiales y características del macizo rocoso (contenido de humedad, gradación, mineralogía, geoquímica, resistencia a roturas, compresibilidad, permeabilidad), estratigrafía, geomorfología, recursos minerales. Peligros naturales – derrumbamientos de tierras, avalanchas y torrentes de detritos, sismicidad, potencial de inundación, acción de escarcha, viento, movimiento de hielo.
- Tenencia y utilización de tierras y aguas circundantes
- Biológicas – identificación del ecosistema, flora y fauna

La ubicación y datos esenciales justificativos del campo y de programas analíticos relacionados con el emplazamiento.

- Mapas topográficos y de sistema cuadriculado
- Plano de referencia, ubicación de los puntos de referencia topográfica
- Registros y ubicaciones de los taladros de prueba, agujeros de penetración, barrenos, pruebas geofísicas, sondeos, etc.
- Tipo y ubicación de instrumentos: piezómetros, inclinómetros, indicadores de asentamiento, flujómetros, etc.
- Levantamientos geofísicos

- Condiciones y características de los relaves/suelo/roca - contenido de humedad, gradación, mineralogía, geoquímica, resistencia a la cizalla, compresibilidad, permeabilidad
- Puntos de muestreo de agua subterránea y agua superficial
- Puntos de conformidad reglamentarios
- Características del agua, ambiente de origen natural.

4.2.2.3. Componentes típicos de una instalación:

Proporcionar una lista del equipo y las estructuras importantes que comprenden la instalación, incluyendo los que estén relacionados con la entrega de relaves y la gestión de relaves o de recursos hídricos.

Gestión de relaves

- Presas, diques y estructuras de contención
- Playas de relaves
- Pendientes de contención de perímetro
- Cresta de la presa
- Diques iniciales y bermas
- Área de retención
- Aparatos
- Vegetación
- Sistemas de control de polvo
- Zanjas
- Alcantarillas
- Canales de desagüe
- Presas-vertedero pequeñas
- Revestimientos
- Obras de regulación
- Conductos de relaves y agua
- Bombas y estaciones de bombeo
- Puentes para conductos
- Agua
- Sistemas de zanja y bombeo para recuperación de pérdidas por infiltración
- Estructuras de decantación
- Aliviaderos de presa

- Sifones
- Barcaza de desecación
- Desviaciones de arroyos
- Desviación de zanjas
- Planta de tratamiento de agua

Infraestructura

- Corredores de servicio
- Líneas de gas
- Líneas de productos
- Carreteras, rampas, vías férreas
- Edificios
- Suministro de energía, principal y de reserva
- Telecomunicaciones
- Líneas de transmisión
- Interruptores
- Inclusiones
- Señalización
- Puertas
- Vallas

Instrumentos

- Piezómetros
- Pozos de agua subterránea
- Vertederos de aforo
- Inclinómetros
- Monumentos de movimiento en la superficie
- Controles informatizados
- Indicadores de densidad de lodo
- Indicadores del nivel de agua

Datos justificativos y referencias pertinentes sobre los componentes de la instalación, incluyendo los aparatos y los tipos de instrumentos

- Detalles de los componentes típicos
- Dimensiones de los componentes importantes
- Diámetro, grosor y composición de los conductos

- Tipo de presa, método de construcción, clasificación de consecuencias de fallas
- Planes, mapas, fotografías y planos que muestran la ubicación del equipo y las estructuras fijas, en la superficie y enterrados.
- Características y capacidad de los relaves y materiales de construcción
- Fecha de construcción/instalación
- Dónde encontrar:
  - Los documentos, manuales y planos de diseño/construcción
  - Motivos/criterios del diseño
  - Los documentos según construcción – manuales, planos y especificaciones.

4.2.2.4. Requisitos reglamentarios

Hacer una lista de todas las aprobaciones reglamentarias. Describir su propósito, requisitos en materia de conformidad y de informes, y períodos respectivos de aplicabilidad. Incluir referencias al personal responsable de asegurar la conformidad, procedimientos de seguimiento de permisos, y ubicaciones de toda la documentación reglamentaria.

Cuestiones típicas de conformidad reglamentaria

- Garantía financiera
- Evaluación medioambiental
- Importación y utilización del agua
- Criterios de aguas receptoras y residuales (agua superficial y subterránea)
- Reciclaje de agua
- Seguridad de la presa
- Utilización y perturbación de la tierra
- Gestión de desechos
- Impactos en la vegetación, la fauna, la flora y los peces
- Rescate progresivo
- Clausura y cierre definitivo
- Polvo, vapor y emisiones fugitivas
- Tolerancia al ruido y al olor
- Materiales peligrosos y sustancias designadas
- Presentación de informes reglamentarios
- Extensión de los servicios a la comunidad

Base del diseño y criterios de diseño

Describir la base y los criterios de diseño de la instalación:

■ La base del diseño trata las condiciones impuestas por el emplazamiento, requisitos del proyecto y reglamentos

■ Los criterios de diseño son normas establecidas por la regulación y/o práctica de la ingeniería, de acuerdo con la base del diseño.

Documentar las modificaciones del diseño junto con las evaluaciones de riesgos relacionados y la autorización de la dirección para tales modificaciones.

Proporcionar suficiente información para:

■ Transmitir la capacidad y la base de diseño de la instalación de gestión de relaves o de recursos hídricos

■ Asegurar que los criterios actuales de diseño siempre sean fáciles de conseguir para permitir la comparación del rendimiento de la instalación con la intención del diseño

■ Orientar la revisión del diseño como algo necesario para evaluar las necesidades de cambios en materia de diseño o procedimientos.

Proporcionar referencias a documentos justificativos, incluyendo el diseño inicial y posterior y los informes de ingeniería que describen la base de diseño y los detalles de cambios.

Base del diseño

Condiciones del emplazamiento y requisitos o limitaciones del proyecto

Características del emplazamiento

- Capacidad de la cuenca, huella, hidrología y vida operativa
- Limitaciones del emplazamiento, peligros naturales
- Consideraciones climáticas
- Cambio de elevación y distancia desde la planta
- Condiciones de los cimientos
- Geología superficial y del rocoso

Requisitos de operación

- Capacidad de la cuenca, huella, hidrología y vida operativa
- Limitaciones del emplazamiento, peligros naturales
- Consideraciones climáticas
- Cambio de elevación y distancia desde la planta

- Condiciones de los cimientos
- Geología superficial y del rocoso
- Reserva de minerales, duración de la mina, producción anual
- Densidad de la pulpa de relaves en el conducto de entrega
- Tasas de producción de relaves y relleno de la cuenca, programa de levantamiento del embalsamiento
- Características de los relaves, incluyendo la gradación, química, mineralogía, densidad depositada seca
- Procedimientos de deposición de relaves – ciclonaje, tubería de extremo macho, construcción de celdas, descarga final
- Química del agua con lodo
- Anchura de la cresta de la presa
- Anchura e inclinación de la playa de relaves
- Normas de calidad del agua superficial y subterránea
- Equilibrio del agua, tasa de agua regenerada de la planta, capacidad de la planta de tratamiento
- Gestión de recursos hídricos (incluyendo obras de desvío, estructuras de salida y requisitos de francobordo)
- Francobordo de estaque, asentamiento y consolidación
- Reglamentos
- Potencial de generación de ácido
- Tiempo de retención del estanque, química del estanque
- Medidas de control de infiltración del estanque, requisitos químicos del agua superficial y subterránea del perímetro
- Requisitos de desviación del escurrimiento de la cuenca de captación
- Clausura, cierre y restauración.

Los requisitos de cierre también influyen en el diseño operativo de una instalación. Por consiguiente, la base de diseño y criterios para el cierre, incluida la clausura y la recuperación, deben incluirse en el manual.

Los planes de cierre con frecuencia se desarrollan durante la etapa de operación de la instalación.

Criterios de diseño

- Normas establecidas por el ejercicio y/o la regulación de la ingeniería
- Altura y pendientes máximas de la presa y los relaves
- Materiales de construcción de la presa
- Métodos de construcción de la presa
- Criterios de diseño sísmicos
- Etapas de desarrollo, límites de infiltración y deformación
- Licuefacción y compactación
- Criterios de almacenamiento y elección de rutas para los afluentes de inundaciones
- Factor de seguridad para pendientes de perímetro para operación y cierre definitivo
- Clasificación de las consecuencias de la falla del embalsamiento
- Riesgo aceptable

4.2.2.5. Historial de la construcción

Proveer un resumen del historial de la construcción de una instalación, incluyendo, según disponibilidad, referencia a cualquier problema o circunstancia única encontrados, y una descripción de los procedimientos de construcción. La inspección y revisiones continuas deben ampliar el registro documentado con el tiempo.

Datos típicos del historial de construcción

- Fechas de construcción
- Descripción general de la construcción
- Ingeniero de registro, contratista de construcción
- Tamaño, escala, complejidad y facilidad (o dificultad) de la construcción de cada etapa
- Resumen de los elementos clave de la instalación que fueron construidos
- Tipo y fuente de los materiales de construcción
- Resumen de los problemas o circunstancias únicas encontrados, incluyendo las condiciones naturales (condiciones del terreno, atmosféricas, etc.) o las provocadas por el hombre (modificaciones del diseño aprobado, métodos de construcción que difieren de las normas, etc.)

- Lista de documentos justificativos que proporcionan más detalles con relación a la construcción
  ■ Investigaciones, diseños, especificaciones, documentos según construcción, fotografías, etc.
  ■ Lista de personas clave encargadas de la supervisión y la documentación de la construcción
  ■ Vínculos de las etapas de construcción con la gestión de relaves y de recursos hídricos, etc.

4.2.2.6. Control de documentos

Definir los procedimientos para la gestión y la retención de información, datos, documentos de diseño y rendimiento, tanto en copia impresa como electrónica, incluyendo el número de la revisión o de la versión, la ubicación, circulación, y las prácticas de archivo y de copia de seguridad. Incluir la base y el programa de retención de la información esencial, y la eliminación y archivo de la información no esencial, durante la vida de la instalación.

Delinear la disponibilidad y controles de acceso de documentos clave, a fin de asegurar la accesibilidad e integridad continuas del registro de datos, y evitar que los archivos se pierdan, se saquen o se traspapelen. Describir el método de recuperación de información de las bases de datos electrónicas.

Proporcionar listas actualizadas de documentos e informes justificativos pertinentes, junto con la ubicación de los documentos e informes no incluidos en el manual.

Documentos e informes de referencia típicos

- Informes iniciales de la investigación del emplazamiento, de la geología y del medioambiente
- Evaluación ambiental
- Resultados de laboratorio y de pruebas de campo
- Informes de diseño
- Informes de construcción
- Informes hidrológicos y meteorológicos
- Planes y manuales de vendedores
- Planes de gestión de la deposición de relaves y de recursos hídricos

- Informes del examen de la inspección y seguridad de presas
- Control y seguimiento medioambiental
- Manuales e informes de instrumentos, vigilancia y control
- Informes y evaluaciones de riesgos
- Informes de incidentes graves
- Planes de contingencia para la preparación, reacción y acción en caso de emergencia
- Plan de clausura y cierre definitivo.

Las repercusiones de las decisiones tomadas en el diseño y la gestión de las instalaciones de gestión de relaves y de recursos hídricos se acumulan durante largos períodos de tiempo. Es posible que los impactos resultantes no sean evidentes hasta una fecha futura. Por consiguiente, es importante que la información esencial se pase a los operadores futuros a fin de que las metodologías operativas y las intenciones anteriores no se pierdan con el paso del tiempo.

La documentación hace depender menos de la memoria de una persona, y más de un sistema formalizado del que se pueden transferir conocimientos.

4.2.3. Operación

El plan de operación para una instalación de gestión de relaves o de recursos hídricos conlleva el transporte y contención de relaves, agua de elaboración, efluentes y relaves, y el reciclaje de agua de elaboración.

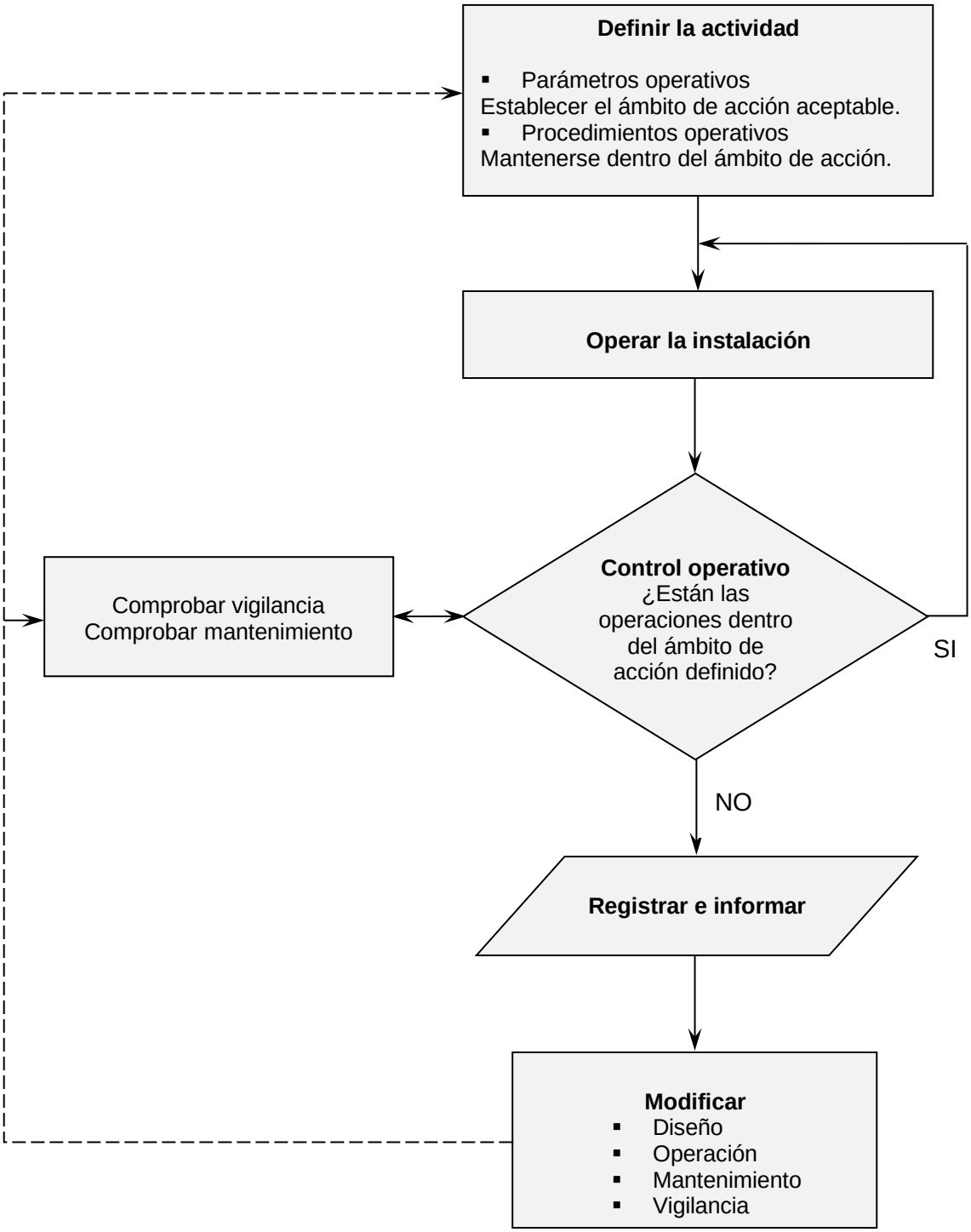


Figura 4.2 Flujograma de la operación

Fuente: Adaptado de *Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities,* [Figura 3 *Operation flow chart*] (p.18) *First Edition (1998)* The Mining Association of Canada

4.2.3.1. Transporte y deposición de relaves

Describir el plan de deposición. Proveer un resumen del plan de deposición del ciclo de vida completo, junto con planes anuales detallados del año presente, en los que se identifiquen las ubicaciones de descarga, el programa de descarga y la construcción planificada, con referencia a los planes e informes justificativos.

Determinar los parámetros y procedimientos operativos clave, y un programa para la inspección periódica comparada con el diseño.

Parámetros típicos de transporte y disposición de relaves

- Proyecciones de la cantidad y la medida del caudal del lodo de relaves
- Presiones de funcionamiento del bombeo y el conducto
- Densidad del lodo y otras propiedades físicas y químicas, temperatura
- Gradación, mineralogía, gravedad específica, densidad, angularidad, contenido de arcilla y plasticidad, potencial de generación de ácido y lixiviación de metales de los relaves
- Técnica de deposición de relaves y compactación
- Playa de relaves y pendientes submarinas
- Máxima elevación de la cresta de la playa
- Anchura máxima y mínima de playa
- Propiedades químicas del agua intersticial y del agua de decantación de los relaves.

Durante la operación de la instalación, pueden variar las características físicas, químicas y mineralógicas de los relaves. Deben recogerse periódicamente muestras representativas de los relaves para someterlas a un análisis. Estos análisis resultarán útiles para verificar cualquier cambio en las características físicas, químicas y mineralógicas de los relaves que podrían tener un impacto en el plan de deposición (una modificación en la gravedad específica de los relaves puede afectar la pendiente de deposición del material), la densidad de los depósitos de relaves, la calidad final de las aguas efluentes o la estrategia de rehabilitación.

Procedimientos típicos de transporte y disposición de relaves

- Deposición de relaves
    - ■ Seguridad de la presa
    - ■ Etapas de los elevadores de presas
    - ■ Capacidad de almacenamiento de sólidos
    - ■ Reciclaje de agua
    - ■ Requisitos de tratamiento de agua
    - ■ Construcción de celdas, tubería de extremo macho, varada contenida
    - ■ Compactación
- Instrucciones de funcionamiento para tuberías, bombas, etc.
    - ■ Reubicación de la línea de relaves
    - ■ Presión de la línea
    - ■ Densidad del producto molido
    - ■ Rotación de la tubería
    - ■ Aberturas de válvulas
    - ■ Roturas del vacío
    - ■ Medidas para prevenir el enarenado o congelación de la línea o la bomba
    - ■ Medidas para purgar o descongelar líneas
- Respuesta a las desviaciones en las propiedades físicas, químicas o mineralógicas con respecto al diseño
- Respuesta a las condiciones operativas poco comunes, como las condiciones atmosféricas invernales severas, períodos de altas precipitaciones, sequía y vientos fuertes
- Funciones mecánicas, como la rotación de línea, reubicación de línea y abertura de válvulas.

4.2.3.2. Levantamiento de presas y cuencas

Determinar los requisitos y planes para la construcción por etapas de una presa durante la vida de la instalación, para mantener una capacidad adecuada de almacenamiento de sólidos y permitir un pulido adecuado de la capa superficial durante la operación, incluyendo:

- ■ Los métodos de construcción de la presa – tuberías de extremo macho, construcción de celdas, río arriba, río abajo, etc.

■ Los procedimientos de deposición de relaves, tomando en consideración la seguridad de la presa – etapas para elevadores de presas, capacidad de almacenamiento de sólidos, requisitos de reciclaje y tratamiento de agua; y

■ Medidas de control de calidad para asegurar que la construcción se realice de forma adecuada.

Parámetros típicos de levantamiento de presa y cuenca

- Altura máxima y mínima
- Programa de levantamiento de presas
- Fuentes del material de construcción
- Densidad del material colocado
- Pendientes de perímetro
- Recuperación progresiva
- Presión de la superficie freática y del agua intersticial
- Anchura de la playa
- Características de los materiales de construcción para los cimientos y la presa
- Densidad del lodo
- Volumen de transporte de relaves.

Procedimientos típicos de levantamiento de presa y cuenca

- Control de la erosión
- Compactación
- Colocación de material, tuberías de extremo macho, construcción de celdas, descarga de punto único
- Preparación del emplazamiento, eliminación de la vegetación/material de recubrimiento, relleno de tierra y roca
- Construcción de filtros
- Instalación o extensión de instrumentos.

4.2.3.3. Gestión de recursos hídricos

Describir los procedimientos para el control del caudal de agua mediante una instalación siguiendo prácticas operativas normales, así como bajo circunstancias especiales, tales como el escurrimiento de primavera, incidencias de precipitaciones o sequía severas. Describir el balance hídrico, incluyendo la determinación de todas las entradas, inventario de aguas de embalse e intersticiales, y caudales efluentes.

Determinar los parámetros operativos clave y definir los procedimientos operativos relacionados con el balance de agua y a la gestión de recursos hídricos de la instalación, incluyendo aliviaderos de presa, sistemas de decantación, sifones, zanjas, canales de drenaje y presas-vertedero pequeñas.

Proporcionar referencias para los informes y planes justificativos.

Parámetros operativos de gestión de recursos hídricos típicos

- Francobordo mínimo
- Etapas de curvas de almacenamiento
- Niveles de agua operativos y anchuras de playa máximos y mínimos (consideraciones estacionales, viento, incidencias de inundaciones y sequías, y el programa de tratamiento)
- Tablas de niveles objetivo de embalse
- Descarga, volumen y cantidad de agua (condiciones operativas normales y circunstancias especiales).

Procedimientos operativos de gestión de recursos hídricos típicos

- Control de caudales afluentes y efluentes
- Regulación de crecidas
- Retorno de aguas de infiltración
- Regeneración de agua.

4.2.3.4. Protección medioambiental

Para la protección medioambiental de debe definir los parámetros y procedimientos para proteger el medio ambiente, controlando los relaves y el agua mediante el tratamiento y la gestión; también documentar los requisitos de presentación de informes reglamentarios

Parámetros típicos de protección medioambiental

- Calidad y medida del caudal de descarga de agua o efluentes
- Propiedades químicas del agua intersticial, agua subterránea, agua de infiltración y agua de decantación de los relaves
- Cantidad y calidad del porcentaje de polvo/partículas
- Criterios de emisión de niebla o vapor
- Huella de la cuenca
- Biomasa/biodiversidad, fauna y flora, vida acuática, ganado y hábitat.

Procedimientos típicos de protección ambiental

- Planta de tratamiento
  - ■ Operaciones de unidades
  - ■ Adición de reactivo
  - ■ Control de instrumentación y de proceso
- Captación, tratamiento y transporte, incluyendo rebombeo, de agua superficial, agua subterránea y agua de infiltración
- Reducción de polvo
- Reducción de niebla o vapor
- Protección de la flora y fauna, vida acuática y del ganado
- Manejo de materiales peligrosos y sustancias designadas
- Rescate de tierras y revegetación
- Rehabilitación progresiva.

4.2.3.5. Seguridad y protección

Definir los parámetros y procedimientos para controlar el acceso al emplazamiento, a fin de asegurar tanto la integridad de la instalación como la seguridad del personal del emplazamiento y del público general. Tratar los peligros o restricciones de seguridad relacionados con el contacto humano con los relaves o materiales de decantación, incluyendo el riesgo al personal que camine u opere el equipo en la instalación.

Parámetros típicos de seguridad y protección

- Acceso al emplazamiento y límites de salida
- Peligros en el lugar de trabajo
- Equipo de protección personal.

Procedimientos típicos de seguridad y protección

- Señalización, cercas y puertas
- Patrullas de seguridad
- Procedimientos operativos seguros en el lugar de trabajo.

4.2.3.6. Documentación

Definir la información que debe ser recopilada y registrada como parte de la operación de la instalación. Las listas de comprobación y los formularios de informes pueden incluirse o mencionarse.

Documentación típica de la operación

- Registros de control de calidad y resúmenes estadísticos

- Registros sobre instrumentaciones y entradas diarias en la agenda
- Registros de comunicaciones y actividades
- Resúmenes fotográficos y/o videos
- Programas
- Órdenes de cambio, memorandos, informes
- Planes e informes según construcción, especialmente del aumento de niveles de la presa.

Presentación de informes

Definir la información que debe presentarse sobre el rendimiento operativo.

Especificar los procedimientos para la presentación de informes de:

■ Las condiciones operativas que requieran mantenimiento; y

■ Las observaciones que puedan determinar un cambio significativo en las condiciones en la instalación.

4.2.4. Mantenimiento

El programa de mantenimiento para una instalación de gestión de relaves o de recursos hídricos conlleva la identificación y descripción de partes críticas, mantenimiento de rutina, mantenimiento predictivo y mantenimiento motivado por incidentes y observaciones de operación y vigilancia para todos los componentes civiles, mecánicos, eléctricos y de componentes de instrumentación de una instalación.

Contenidos típicos de un plan de mantenimiento

- Declaración del objetivo
- Responsabilidad general del mantenimiento
  - ■ Organigrama de mantenimiento, puesto, nombre e información de la persona contacto
  - ■ Calificaciones necesarias y familiaridad con el modelo de gestión
- Inventario de los componentes sujetos a mantenimiento, y para cada componente
  - ■ Dónde está ubicado
  - ■ Cuándo debe hacerse el mantenimiento
    - • Si es mantenimiento de rutina o preventivo, con qué frecuencia
    - • Si es mantenimiento motivado por incidentes, qué lo ha provocado
  - ■ Normas de referencia

    - Normas de diseño o rendimiento
    - Manuales de funcionamiento y mantenimiento del equipo

- Programa para comprobar el equipo de emergencia y la lista de piezas de repuesto críticas
- Qué debe documentarse
  - Estado de los componentes
  - Acción de mantenimiento emprendida, norma cumplida
  - Recomendación para la próxima acción
- Presentación de informes
  - A quién
  - Cuándo
  - Cómo y de qué forma

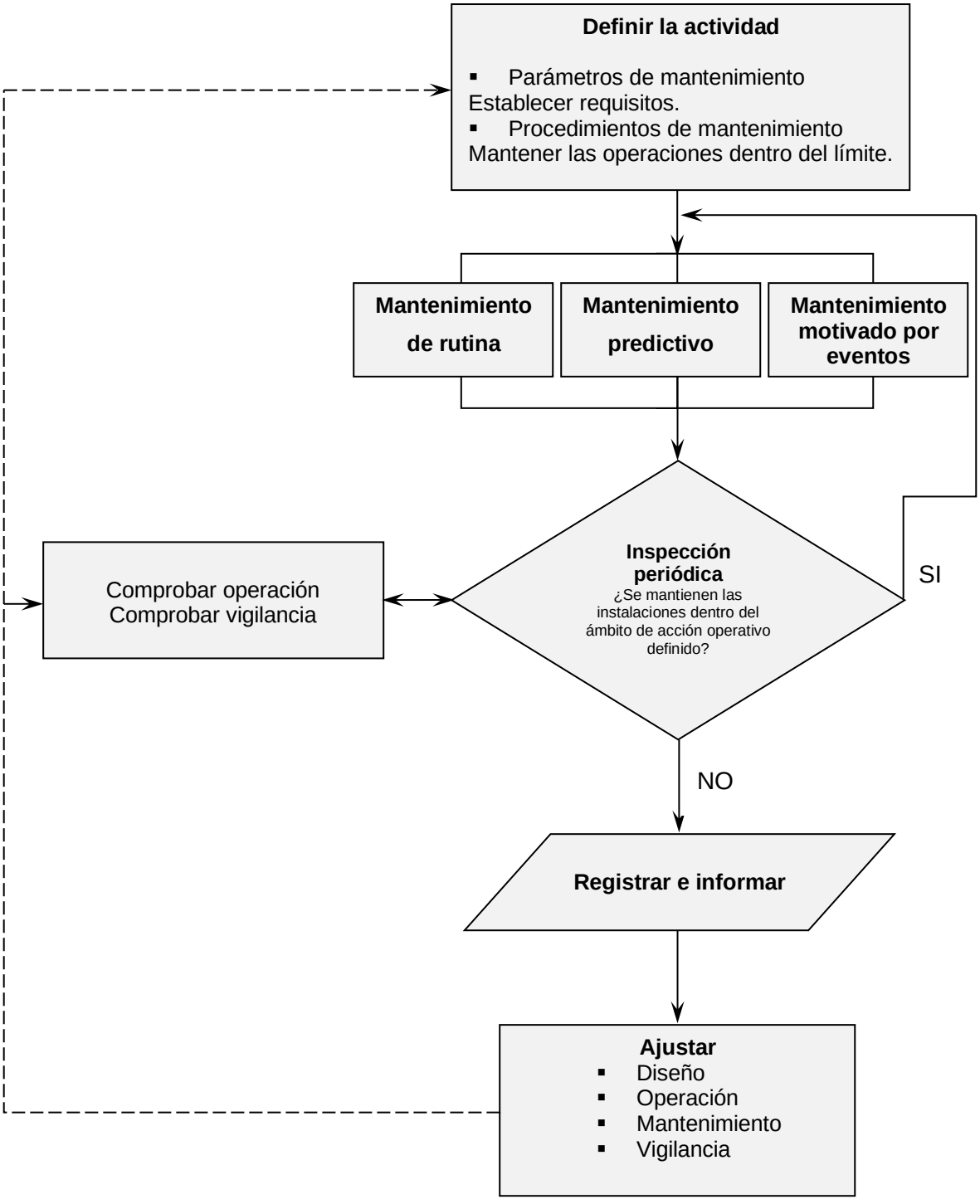


Figura 4.3 Flujograma de mantenimiento

Fuente: Adaptado de *Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities,* [Figura 4 *Maintenance flow chart*] (p.24) *First Edition (1998)* The Mining Association of Canada

4.2.4.1. Parámetros de mantenimiento

Definir los parámetros de mantenimiento que tratan los requisitos civiles, mecánicos, eléctricos y de instrumentaciones.

Parámetros típicos de mantenimiento

- Acceso al emplazamiento
- Capacidad de las zanjas, aliviaderos de presa y presas-vertedero pequeñas
- Integridad de la estructura de apoyo
- Disponibilidad y fiabilidad del equipo
- Criterios de grosor y desgaste de conductos
- Grosor mínimo de la línea de relaves, y los requisitos relacionados
- Controles de instrumentación de proceso y vigilancia
- Interruptores, dispositivos para cortar corriente y medidores
- Erosión
- Vegetación
- Vida económica de diseño.

El mantenimiento predictivo utiliza la información obtenida:

• Del historial de operación del equipo

• Del esfuerzo de mantenimiento (costos)

• De las condiciones del emplazamiento para ayudar en la determinación de las necesidades de servicio puntual a fin de evitar las averías costosas, largas o inoportunas.

4.2.4.2. Mantenimiento de rutina y predictivo

Explicar brevemente los procedimientos de mantenimiento de rutina y predictivo para todos los componentes identificados de la instalación, especificando lo siguiente:

■ La priorización, basada en los riesgos y las consecuencias

■ La disponibilidad del material y el equipo

■ Los planes de acción de mantenimiento, incluyendo las reparaciones y los reemplazos, según sea necesario

■ La documentación del mantenimiento llevado a cabo.

Mantenimiento motivado por eventos

Proporcionar procedimientos para tratar las condiciones o incidentes que requieran mantenimiento, que puede surgir de las observaciones de otras actividades y resultar en acciones de mantenimiento planeadas o no planeadas, especificando lo siguiente:

- La priorización, basada en los riesgos y las consecuencias
- Los procedimientos de “aviso” del equipo de mantenimiento
- La disponibilidad del material y el equipo
- Los planes de acción de mantenimiento, incluyendo las reparaciones y los reemplazos según sea necesario
- Los procedimientos/preocupaciones de protección y seguridad
- El retorno a la operación normal
- La documentación del mantenimiento realizado.

Un componente clave de la planificación del mantenimiento es la preparación para responder a las averías, incidentes o condiciones que requieran mantenimiento.

Sin embargo, es importante distinguir entre los requisitos de mantenimiento y los de reacción en casos de emergencia; las acciones de mantenimiento no tratan las situaciones de emergencia, que deben tratarse en el plan de intervención en caso de emergencia o el plan de reacción en caso de emergencia, o en ambos.

4.2.4.3. Documentación

Definir la información que debe ser recopilada y registrada como parte del mantenimiento de la instalación. Las listas de comprobación y los formularios de informes pueden incluirse o mencionarse.

Documentación de mantenimiento típica

- Diarios actualizados del equipo
- Historial de trabajo
- Frecuencia y causa de los problemas
- Fiabilidad de los componentes
- Registros de control de calidad
- Anotaciones diarias del diario
- Registros de comunicaciones y actividades
- Resúmenes fotográficos y/o videos

- Inventario de repuestos, materiales, herramientas y equipo
- Lista de repuestos críticos
- Programas
- Órdenes de cambio
- Memorandos
- Informes

Presentación de informes

Definir la información de mantenimiento que debe presentarse.

Especificar procedimientos para:

- Informar sobre las condiciones operativas que requieran mantenimiento
- Informar sobre las observaciones importantes de las actividades de mantenimiento, incluyendo los requisitos de mantenimiento mayores de lo esperado y un exceso de mantenimiento motivado por eventos.

Tal presentación de informes puede jugar un papel decisivo en determinar y tratar las condiciones cambiadas en la instalación.

4.2.5. Vigilancia

La vigilancia supone la inspección y control de la operación, la integridad estructural y la seguridad de una instalación. Consiste en una comparación tanto cualitativa como cuantitativa del comportamiento real con el previsto.

Debe ser un programa diseñado plenamente integrado con las actividades de operación y mantenimiento, conformes a la etapa del ciclo de vida y a los requisitos reglamentarios.

El análisis regular de la información sobre vigilancia puede proporcionar una indicación temprana de las tendencias de rendimiento que, aunque dentro de las especificaciones, justifican más evaluaciones o acciones.

Todo el personal que trabaja en una instalación de gestión de relaves debe participar en la vigilancia como parte rutinaria de las actividades diarias, manteniendo la conciencia visual de la instalación durante sus funciones normales o rutinarias, además de la ingeniería del emplazamiento, el control de instrumentos, análisis, inspección, examen periódico y supervisión específicos para la vigilancia.

Objetivo:

- Determinar los parámetros y procedimientos de vigilancia clave para:
  - ■ Controlar la operación, seguridad y rendimiento ambiental de instalaciones de gestión de relaves y de recursos hídricos
  - ■ Identificar y evaluar con prontitud las desviaciones del comportamiento previsto que afectan la seguridad operacional, la integridad estructural y el desempeño medioambiental de la instalación
  - ■ Informar sobre las observaciones importantes para obtener respuesta.
- Asegurar que el personal sepa sobre la necesidad de informar y actuar en cuanto a las diferencias observadas con respecto al comportamiento previsto.

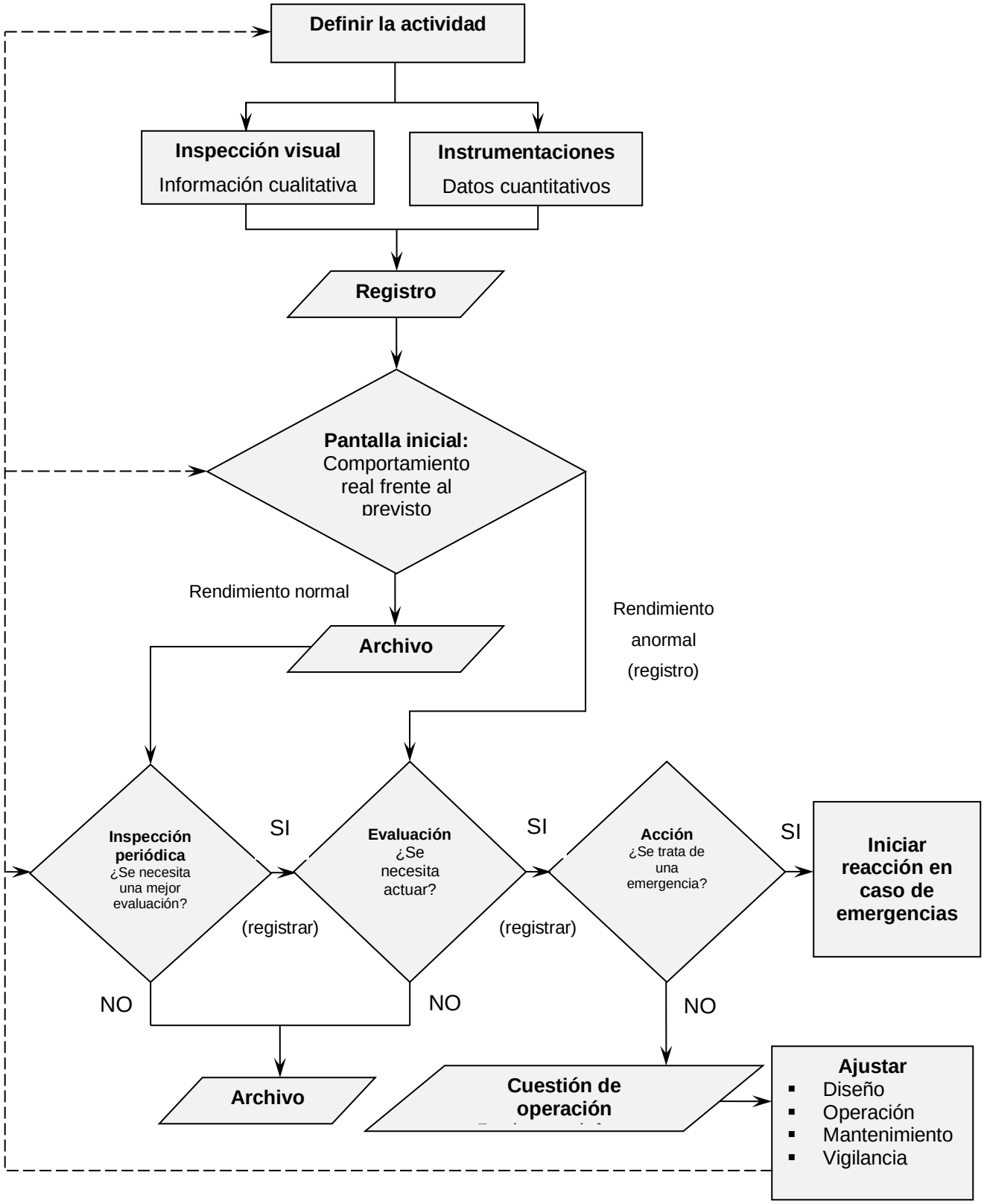


Figura 4.4 Flujograma de vigilancia

Fuente: Adaptado de *Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities,* [Figura 5 *Surveillance flowchart*] (p.28) *First Edition (1998)* The Mining Association of Canada

4.2.5.1. Parámetros de vigilancia

Determinar y describir los modos de fallas potenciales para evaluarlos e incluirlos en un programa de vigilancia. Definir los parámetros clave de vigilancia para apoyar la operación de la instalación, tomando como base los modos de falla determinados.

Parámetros típicos de vigilancia

Explicación e ilustración de cómo puede producirse una falla, junto con las posibles causas detonantes, efectos visuales y de instrumentación

Observaciones visuales

- Superficie – fisuración, dilatación, depresiones, dolinas, vegetación
- Erosión de la pendiente
- Niveles de agua
- Infiltración – nuevas zonas de infiltración, cambios en la zona de infiltración
- Pendientes de playa
- Clasificación de las posibles observaciones que concordarían con el comportamiento previsto, y las que no concordarían.

Instrumentación

- Desplazamiento de pendientes – hitos topográficos, inclinómetros de pendientes
- Control de la presión intersticial – tubos verticales, neumáticos
- Control sísmico
- Control de la calidad del agua – superficie, agujero de sondeo, turbidez
- Control biológico
- Muestreo de polvo
- Tiempo
- Comunicaciones
- Suministro de energía
- Presión y caudal de los conductos
- Niveles de agua.

Existen parámetros clave de rendimiento para los que puede controlarse el comportamiento previsto – francobordo, tasa de infiltración, desplazamientos de la estructura de contención,

Presiones hidrostáticas, y química de las infiltraciones y las aguas superficiales circundantes.

4.2.5.2. Procedimientos de vigilancia

La vigilancia proporciona un mecanismo de apoyo al diseño y a la operación.

Puede provocar cambios en las operaciones y/o el mantenimiento, o iniciar una reacción en casos de emergencia. Consiste en una serie de procedimientos que deben estar claramente definidos y deben seguirse. La preparación de un programa de vigilancia es una parte esencial del diseño de una instalación.

La vigilancia consiste tanto en procedimientos de rutina como en procedimientos motivados por eventos. Las inspecciones visuales y la lectura de instrumentos que constituyen una parte integral de la vigilancia de rutina pueden también ser esenciales dentro del contexto de la vigilancia motivada por eventos.

Procedimientos típicos de vigilancia

Control e inspección visuales

- Control visual de rutina por el personal del emplazamiento
- Inspecciones periódicas por el personal de ingeniería o especialistas.

Medición de instrumentos

- Levantamiento de planos
- Lectura de instrumentos
- Pruebas de materiales.

Recopilación y análisis de datos

- Examen selectivo inicial de las observaciones de la inspección visual y de los datos de campo según se hayan recopilado, a fin de determinar que las operaciones estén dentro de los criterios de rendimiento
- Examen selectivo periódico de seguimiento de las observaciones y los datos recopilados para determinar las tendencias con relación a los criterios de rendimiento.

Inspección y análisis periódicos

- De las observaciones recopiladas de la inspección visual y las lecturas de instrumentos

- Del rendimiento de la instalación completa
- De la validez continua de los criterios de diseño y rendimiento de la instalación, incluida la vigilancia.

Documentación y presentación de informes

4.2.5.3. Control visual

Esbozar los tipos de indicadores visuales de los que tiene que ser consciente el personal del emplazamiento como rutina. Por ejemplo, la aparición de, o los cambios en las grietas, hundimientos, infiltración y/o vegetación anómala dentro de la zona de gestión de relaves o de recursos hídricos o en su proximidad inmediata podrían constituir una causa detonante de la inspección específica del emplazamiento.

Especificar la frecuencia de las inspecciones visuales.

Especificar el modo de registro de las inspecciones visuales, preferiblemente en formularios o listas de comprobación estándares, que fomenten la cuantificación de las observaciones, donde corresponda, tales como la anchura de las grietas, la zona, el volumen, el color y la claridad, etc. de la infiltración.

Especificar los criterios para un examen selectivo inicial y presentación de informes sobre las observaciones.

Especificar la frecuencia, modo de presentación de informes y normas de documentación para la inspección visual de rutina de toda la instalación por el personal de ingeniería o especialistas. Determinar las condiciones, tales como la suspensión de la operación o el cierre definitivo de la instalación, durante las cuales se pueda cambiar la frecuencia de las inspecciones de rutina.

Especificar los procedimientos para la acción necesaria en el caso de cualquier cambio repentino en el comportamiento, como niveles de agua anormales, aumento de la infiltración, bajadas de cresta, hundimientos y fisuración, que pueda requerir una presentación de informes específica de los incidentes, y que normalmente provocaría algún tipo de acción.

Definir los criterios que provocan las inspecciones especiales motivadas por eventos, junto con la documentación y el seguimiento necesarios. Tales eventos típicamente incluyen el primer relleno, terremotos, precipitaciones extremas, inundaciones o problemas de operación. El rendimiento de la instalación mediante estos eventos es

especialmente importante ya que define la capacidad para hacer frente a eventos extremos.

El control visual no es simplemente una actividad de especialistas - todo el personal del emplazamiento debería estar capacitado para observar y documentar el rendimiento de la instalación, proporcionado por lo menos una conciencia cualitativa de las desviaciones con respecto al rendimiento normal de la instalación de gestión de relaves o de recursos hídricos, o a los criterios de rendimiento.

4.2.5.4. Medición de instrumentos

Medición y control típicos de los instrumentos

- Levantamiento de planos de
  - ■ Perfil de playa, nivel de embalse y batimetría
  - ■ Capa de hielo y de nieve
  - ■ Perfil de la presa
  - ■ Asentamiento y desplazamiento
  - ■ Flora y fauna, y vida acuática
  - ■ Vegetación
- Muestreo y pruebas
  - ■ Características y propiedades de los relaves
  - ■ Mineralogía, densidad y gradación in situ de los relaves
  - ■ Química del agua
- Mediciones del caudal
- Piezómetros
- Inclinómetros de pendientes
- Indicadores de asentamiento
- Termistores
- Estaciones meteorológicas.

Proporcionar una lista completa de toda instrumentación, con:

- ■ La identificación de los instrumentos
- ■ La ubicación señalada en un plano del emplazamiento
- ■ Registro de la instalación, fecha de instalación, posición inspeccionada, profundidad del taladro de prueba, elevación de la parte superior del agujero, diámetro, detalles del relleno, tipo de instrumento, profundidad, número de serie
- ■ Procedimientos de recopilación y validación de datos

- Frecuencia de control
- Reducción de datos e interpretación de procedimientos
- Problemas de calibrado
- Gestión y almacenamiento de datos.

Especificar la recopilación de datos, la lectura de instrumentos y las frecuencias de control con respecto al diseño, los requisitos operativos y las condiciones del emplazamiento.

Especificar los criterios para el examen selectivo inicial de las lecturas de los instrumentos en el campo en el momento de la recopilación, y determinar el fundamento para volver a comprobar lecturas anómalas (que deberían mantenerse en el registro).

La medición y control de instrumentos cuantifica el comportamiento de la instalación en comparación con los criterios de rendimiento, y extiende la observación operacional hasta por debajo de la superficie, más allá del límite de la inspección visual.

4.2.5.5. Compaginación y análisis de datos

Especificar los procedimientos para el examen selectivo inicial, la documentación y compaginación de datos a partir de la inspección visual y de la medición de instrumentos.

Establecer parámetros de reducción y análisis de datos.

Especificar los criterios para el análisis de los informes de observación e inspección visuales y de las mediciones de los instrumentos comparados con los criterios de rendimiento. Determinar los límites de los parámetros que representen lo siguiente:

- Rendimiento normal (aceptable), seguimiento normal
- Rendimiento anormal, deben iniciarse vigilancia o evaluación adicionales
- Rendimiento anormal, debe iniciarse un cambio en la operación, mantenimiento y/o diseño de la instalación
- Rendimiento anormal, deben iniciarse alerta y acciones a tomarse en caso de emergencia.

Establecer un programa para la revisión periódica de los informes de inspección y observación visuales recopilados y de las mediciones de instrumentos, a fin de analizar los datos y las tendencias de rendimiento de la instalación.

Especificar los procedimientos de documentación y presentación de informes para el análisis de los informes de observación e inspección visuales y de la medición de instrumentos.

4.2.5.6. Inspección y análisis periódicos

Determinar la periodicidad para la inspección y análisis de la instalación, considerando las características de operación y emplazamiento, la jurisdicción y la clasificación de consecuencias.

Establecer un programa para la inspección periódica regular de la gestión de relaves y de recursos hídricos de la instalación e inspección de los resultados del programa de vigilancia por un ingeniero calificado que esté familiarizado con la instalación de relaves.

Establecer los criterios para realizar inspecciones independientes de la instalación y del programa de vigilancia después de eventos importantes como terremotos, inundaciones y problemas de operación importantes.

Los datos no se recopilan sólo para llenar los diarios – se recopilan para ser utilizados, y ayudarán a la operación, mantenimiento y vigilancia futuros a fin de operar más eficiente y eficazmente, mientras se gestionan los riesgos y los cambios.

No es suficiente con limitarse a recopilar datos. Los datos deben examinarse selectivamente en el campo para determinar tanto los datos falsos como las situaciones críticas. A continuación debe procederse a la recopilación de datos reunidos de varios puntos por toda la instalación y al análisis comparado con los criterios generales de rendimiento.

Establecer un programa y criterios para una inspección exhaustiva de la instalación, típicamente, cada cinco a diez años según la clasificación de consecuencias de fallas o de acuerdo con el reglamento. Esta inspección exhaustiva debe proporcionar una verificación independiente del desempeño medioambiental y de seguridad de la instalación, la adecuación del programa de vigilancia dentro del marco de gestión, además del estudio y análisis del diseño de la instalación con respecto a las normas actuales y a los posibles modos de fallas.

3.2.5.7. Documentación

Establecer las normas de documentación para la vigilancia, incluyendo el registro de:

- Observaciones de la observación visual de rutina (desviaciones de las condiciones normales o excepciones a las mismas)

- Control y pruebas de instrumentación
- Evaluaciones
- Inspecciones
- Revisiones.

Proporcionar, cuando corresponda, los formularios y listas de comprobación estándares.

Establecer un sistema de copia impresa y archivo electrónico para todos los informes de inspecciones, registros fotográficos y de video, informes de incidentes, lecturas de instrumentación, diagramas de los instrumentos, inspecciones anuales y exámenes realizados por terceros, para que puedan recuperarse rápidamente a fin de examinarlos y en caso de emergencia.

Presentación de informes

Especificar los procedimientos para iniciar las alertas de reacción en caso de emergencia, informar sobre el rendimiento operativo que satisfaga las expectativas, e informar sobre las condiciones que requieran ajustes del diseño, operación, mantenimiento o vigilancia.

Especificar los procedimientos de presentación de informes y el programa de los requisitos reglamentarios.

El programa de vigilancia debe incluir una identificación clara de los puntos detonantes o los cambios para la comunicación obligatoria entre los que controlan el rendimiento y los que controlan el medio para mejorar el rendimiento. El programa de vigilancia debe vincularse al plan de reacción en caso de emergencia para que se tomen medidas si el rendimiento de la instalación llega a un límite más bajo que el de la norma del diseño.

4.2.6. Planificación y reacción en caso de emergencia

Definir los planes de preparación y reacción en caso de emergencia (emergency preparedness and response; EPR, por sus siglas en inglés) para determinar la posibilidad de accidentes, para reaccionar en situaciones de emergencia, y para prevenir o atenuar las repercusiones en el medio ambiente o en la seguridad, tanto dentro como fuera del emplazamiento, asociadas a situaciones de emergencia.

Hacer una lista de las señales de alerta (y clasificarlas) con referencia a los posibles modos de falla o emergencias de una instalación de gestión de relaves y de recursos

hídricos, tanto de fallas estructurales como de fallas debidas a los impactos en el medio ambiente. Entre los ejemplos se incluyen los siguientes:

- Falla de equipo
- Falla de pendiente o cimientos
- Sumersión
- Falla en la línea de transporte de energía
- Infiltración o arranque hidráulico
- Pérdida del control del proceso
- Inundación.

Las señales de alerta y las posibles emergencias son específicas del emplazamiento. Para cada una que figura en la lista y que está clasificada, determinar las medidas y reacciones apropiadas.

Especificar e iniciar un proceso de “aviso”, según corresponda, en caso de un incidente. Especificar las líneas de comunicación dentro del emplazamiento (en las que participen, por ejemplo, la dirección, el personal de operaciones, los ingenieros, los consultores) e incluir nombres, cargos, números de teléfono (oficina y casa) y direcciones de correo electrónico.

Incluir los contactos pertinentes fuera del emplazamiento, tales como los contratistas y los proveedores de equipo.

Especificar el proceso para informar a las partes interesadas externas afectadas – municipios, organismos gubernamentales, organizaciones locales, primeros auxilios, servicio de bomberos, ambulancia, otras personas, etc. – incluir números de teléfono y direcciones de correo electrónico.

Establecer procedimientos de verificación y seguimiento para asegurar que se haya contactado con las partes apropiadas, y que el proceso de aviso se mantenga al día.

Elaborar y mantener planes de contingencia como parte de los planes de EPR.

Comprobar los planes para determinar su eficacia, examinarlos regularmente y actualizarlos cuando corresponda.

Distribuir ampliamente planes de contingencia y de EPR al personal apropiado dentro de la organización, así como a partes interesadas externas que puedan verse potencialmente afectadas.

Las instalaciones de gestión de relaves plantean un riesgo que debe gestionarse. A pesar de los mejores esfuerzos para asegurar que las instalaciones estén diseñadas,

operen y se cierren de forma segura y responsable, es importante tener planes y procedimientos de intervención y reacción para casos de emergencia, en caso de que ocurra un incidente. Los planes generales de intervención y reacción en caso de emergencia de un emplazamiento incluyen los planes y procedimientos específicos para la instalación de gestión de relaves y de recursos hídricos y éstos, a su vez, deben formar parte del modelo de gestión.

Contenidos típicos de los planes de preparación y reacción en caso de emergencia

- Determinación de los modos de falla
- Determinación de las funciones y responsabilidades
- Determinación de requisitos de legislación, códigos de práctica, notificación y obligaciones de presentación de informes
- Determinación de los recursos disponibles
- Acuerdos de ayuda mutua
- Planes de relaciones públicas
- Listas de teléfonos
- Establecimiento de un sistema de comunicación para notificaciones y para efectos de post-notificación
- Análisis de riesgos para efectos tanto dentro como fuera del emplazamiento
- Estudio de inundación, mapas y tablas para emisiones físicas y en el medio ambiente (incluyendo rotura de la presa)
- Base para la activación del plan de reacción en caso de emergencia y la toma de decisiones en casos de emergencia
- Capacitación del personal
- Investigación y evaluación de incidentes y accidentes
- Planes de contingencia
- Restauración de las condiciones operativas seguras
- Perforaciones de validación, prueba del sistema.

Los planes de preparación y reacción en caso de emergencia deben determinar las medidas que debe tomar el propietario/operador, y las responsabilidades asignadas a personas apropiadas en el emplazamiento, así como a las de otros organismos y partes afectadas.

Las revisiones del diseño durante las operaciones deben seguir un proceso de inspección y aprobación definido, en el que participen de manera apropiada la dirección de la empresa, el personal del emplazamiento y los organismos de reglamentación.

A continuación, se presentan las cuatro listas de comprobación del modelo de gestión de la presa de depósito relaves de Chinchan de la unidad minera Yauliyacu.

Tabla 4.2 Lista de comprobación para la selección y el diseño del emplazamiento de una instalación de relaves.

Acción administrativa	Responsabilidad	Medida de desempeño	Programa de fechas	Referencias
1. Política y compromiso				
Seleccionar un emplazamiento y diseñar una instalación de relaves en cumplimiento de los requisitos regulatorios y de conformidad con prácticas responsables, estándares de la compañía y compromisos asumidos con las comunidades de interés.				
Asegurar que el marco de trabajo para la administración de relaves se implemente mediante las acciones de todos los empleados que trabajan en la instalación.				
Consultar con las comunidades de interés, teniendo en cuenta sus consideraciones respecto de la selección y el diseño del emplazamiento de la instalación de relaves.				
Establecer un programa permanente de revisión y de mejora continua, a fines de manejar los riesgos de salud, de seguridad y medioambientales asociados con las instalaciones de relaves.				
2. Planificación				
2.1. Roles y responsabilidades				
Asignar responsabilidad general con respecto a la administración de relaves a un director ejecutivo de la compañía (gerente general o gerente de operaciones), con responsabilidad para implementar una estructura administrativa adecuada y para asegurar a la organización y a sus comunidades de interés que las instalaciones de relaves se manejan con responsabilidad.				
Asignar responsabilidad y autoridad respecto del presupuesto para la administración de relaves.				
Definir los roles, las responsabilidades y las relaciones para la emisión de informes para la selección del emplazamiento y del equipo de diseño, incluyendo descripciones de los puestos de trabajo y de organigramas.				
2.2. Objetivos				

Desarrollar criterios y procedimientos que aseguren una adecuada selección y el diseño del emplazamiento de la instalación de relaves:				
• Cumplen con requisitos regulatorios, políticas y normas de la compañía, prácticas medioambientales y técnicas responsables y compromisos asumidos con las comunidades de interés				
• Facilitan la retirada del servicio y el cierre definitivo posteriores, incluyendo:				
- Protección de la salud y de la seguridad pública.				
- Mitigación de impactos medioambientales negativos.				
- Uso aceptable posterior al cierre definitivo, dentro de un marco de trabajo técnico y económico viable.				
• Incorporan evaluación de riesgos y control de riesgos, incluyendo planes de contingencia y planificación y respuesta en caso de emergencia.				
• Proporciona protección continua del medio ambiente y de la salud y la seguridad pública				
• Permite que se alcance el desempeño especificado				
Definen los procedimientos de interacción y de comunicación entre el equipo de diseño con la administración y las comunidades.				
Identifican los requisitos para la documentación				
Identifican los requisitos respecto de conocimientos y de capacidades (capacitación y competencia profesional)				
Planifican la selección y el diseño del emplazamiento; establecen un proceso de evaluación, incluyendo:				
• Identificación de aspectos significativos en los ámbitos del medio ambiente, de la salud y de la seguridad, y sus riesgos asociados				
• Estándares para recolectar e interpretar datos medioambientales, científicos y técnicos				
• Evaluación medioambiental				
2.3. Objetivos				
Compilar y llevar un registro de la legislación aplicable, las regulaciones, los permisos y los compromisos.				
Asegurar que se comprendan la legislación aplicable, las regulaciones, los permisos y los compromisos.				

Asegurar que se comprendan las acciones necesarias para asegurar el cumplimiento.				
Establecer y documentar procesos y procedimientos para asegurar el cumplimiento.				
Establecer procedimientos para elaborar informes de cumplimiento y de incumplimiento.				
Comunicar requisitos, procesos y procedimientos para asegurar el cumplimiento de todos los colaboradores.				
2.4. Manejo del riesgo				
Evaluar riesgos y preparar evaluación de riesgos, para la selección y el diseño del emplazamiento				
Desarrollar planes de manejo de riesgos, para la selección y el diseño del emplazamiento, incluyendo:				
• Planes para minimizar la posibilidad de impactos adversos, tanto medioambientales como de seguridad				
• Planes de contingencia				
• Planificación y reacción en caso de emergencia				
2.5. Manejo del cambio				
Preparar y documentar procedimientos para asegurar que se mantenga la integridad del sistema de administración y los diseños y los planes aprobados, mediante la gestión de:				
• Cambios en personal, roles y responsabilidades				
• Cambios, incluyendo los temporales, realizados a planes y a procedimientos aprobados				
• Cambios en requisitos regulatorios				
2.6. Recursos y programación				
Identificar requisitos presupuestarios y asegurar recursos humanos y financieros adecuados a para la selección y el diseño del emplazamiento				
Desarrollar un programa de fechas para la selección y el diseño del emplazamiento				
Identificar los requisitos de recursos para la construcción, las operaciones y la retirada del servicio y el cierre definitivo posteriores				
2.7. Planificación y reacción en caso de emergencia				
Desarrollar y mantener la planificación y reacción en caso de emergencia para identificar situaciones potenciales de accidente o de emergencia, para reaccionar ante situaciones de emergencia y para evitar y mitigar los impactos medioambientales y de seguridad				

asociados con situaciones de emergencia, dentro y fuera del emplazamiento				
Establecer procedimientos para revisión, pruebas y distribución periódica de la planificación y reacción en caso de emergencia dentro de la organización y para participantes externos que potencialmente pudieran verse afectados				
3. Implementación del plan				
3.1. Control de la selección y del diseño del emplazamiento				
Conformar un equipo cualificado y asignar responsabilidades para la selección y el diseño del emplazamiento de la instalación de relaves				
Obtener aprobaciones y permisos para la selección y el diseño del emplazamiento				
De conformidad con los objetivos:				
• Seleccionar un emplazamiento apropiado				
• Diseñar la instalación de relaves				
• Preparar una evaluación de riesgos global				
• Desarrollar planes y procedimientos asociados, incluyendo:				
- Sistema de administración				
- Procedimientos de documentación				
- Procedimientos de construcción				
- Procedimientos de operación, mantenimiento y vigilancia				
- Procedimientos de comunicación				
- Requisitos de conocimientos y de capacidades				
- Plan de retirada del servicio y cierre definitivo				
- Planes de manejo de riesgos				
- Planes de contingencia				
- Planificación y reacción en caso de emergencia				
Implementar control de administración para:				
• Asegurar conformidad con: objetivos y criterios de diseño, prácticas técnicas y medioambientales adecuadas, manejo de riesgos, el marco de trabajo para la administración de relaves y compromisos asumidos con las comunidades de interés				
• Asegurar que se cumplan la legislación, las regulaciones, los permisos y los compromisos				
• Manejar riesgos				
• Manejar cambios				

• Identificar, evaluar el impacto y documentar los cambios efectuados a planos, procedimientos, programas de fechas y presupuestos aprobados				
Implementar y, de manera periódica, realizar pruebas a los planes de contingencia y a la planificación y reacción en caso de emergencia para la selección y el diseño del emplazamiento				
3.2. Control financiero				
Establecer un presupuesto y controles financieros				
Obtener la aprobación del presupuesto para los trabajos				
Comparar los costos operativos y el capital con los presupuestados				
3.3. Documentación				
Preparar, mantener y de manera periódica examinar y revisar los documentos requeridos para seleccionar un emplazamiento y diseñar la instalación de relaves				
Mantener versiones actualizadas de todos los documentos en lugares designados, de fácil acceso, incluyendo:				
• Presentaciones a las agencias regulatorias				
• Registros de capacitación				
• Informes, fotos, videos, etc. de control de calidad				
• Resultados y análisis de controles				
• Condiciones inusuales o especiales				
• Condiciones encontradas				
• Comunicaciones con las comunidades de interés				
Retirar rápidamente del uso y archivar las versiones obsoletas de documentos				
3.4. Capacitación, concientización y competencia profesional				
Contratar personal cualificado				
Asegurar que todo el personal comprenda:				
• La intención del diseño				
• Los riesgos e impactos potenciales del trabajo respecto de la salud, la seguridad y el medio ambiente				
• Las medidas apropiadas para minimizar riesgos e impactos				
Identificar las necesidades de capacitación, capacitar de la manera adecuada y llevar registros de toda la capacitación impartida				
3.5. Comunicaciones				
Implementar procedimientos documentados para las comunicaciones				
• Entre el personal operativo de relaves				

• Con la administración				
• Con las comunidades de interés				
4. Comprobación y acción correctiva				
4.1. Comprobación				
Revisar la selección y el diseño del emplazamiento para asegurar que cumple con los requisitos regulatorios y que se ajusta a políticas y a compromisos				
Considerar una revisión independiente del diseño				
Documentar e informar de inmediato al responsable designado todas las observaciones y las recomendaciones que surjan con motivo de revisiones que específicamente identifiquen asuntos que requieran una acción correctiva.				
4.2. Acción correctiva				
Desarrollar e implementar planes de acción para ocuparse de temas que requieran una acción correctiva				
Documentar la finalización de las acciones correctivas				
5. Revisión anual de administración de relaves para la mejora continua				
Realizar una revisión anual de administración de relaves para:				
• Evaluar el desempeño del sistema de administración de relaves, teniendo en cuenta informes sobre inspecciones, auditorías y evaluaciones; circunstancias que hayan cambiado; recomendaciones y el compromiso con la mejora continua				
• Evaluar si las políticas, los objetivos y el desempeño del sistema de administración de relaves siguen siendo adecuados o si se deben realizar cambios				
• Tratar la necesidad de cambios en los compromisos asumidos con las comunidades de interés				
Informar las observaciones y las conclusiones de esta revisión anual de administración de relaves al director ejecutivo responsable				

Tabla 4.3 Lista de comprobación para la construcción

Acción administrativa	Responsabilidad	Medida de desempeño	Programa de fechas	Referencias
1. Política y compromiso				
Construir la instalación de relaves de acuerdo con el diseño, de manera segura y responsable con el medio ambiente, en cumplimiento de los requisitos regulatorios, y de conformidad con prácticas técnicas responsables, estándares de la compañía, el marco de trabajo para la administración de relaves y compromisos asumidos con las comunidades de interés				
Asegurar que el marco de trabajo para la administración de relaves se implemente mediante las acciones de todos los empleados que trabajan en la instalación				
Consultar con las Comunidades de interés, teniendo en cuenta sus consideraciones con respecto a la construcción de la instalación de relaves				
Establecer un programa permanente de revisión y de mejora continua, a fines de manejar los riesgos de salud, de seguridad y medioambientales asociados con las instalaciones de relaves				
2. Planificación				
2.1. Roles y responsabilidades				
Asignar responsabilidad general con respecto a la administración de relaves a un director ejecutivo de la compañía (gerente general o gerente de operaciones), con responsabilidad para implementar una estructura administrativa adecuada y para asegurar a la organización y a sus comunidades de interés que las instalaciones de relaves se manejan con responsabilidad				
Asignar responsabilidad y autoridad respecto del presupuesto para la administración de relaves				
Definir los roles, las responsabilidades y las relaciones para la emisión de informes para la construcción de la instalación de relaves, con descripciones de los puestos de trabajo y de organigramas, incluyendo:				
• Administración del proyecto				

• Enlace permanente con el equipo de diseño con respecto a las condiciones encontradas, a cambios en el diseño y a la supervisión del emplazamiento				
• Selección de contratistas				
• Control de calidad				
• Protección medioambiental				
• Supervisión, salud y seguridad en la construcción				
• Trabajos temporarios				
• Instrumentación				
• Puesta en marcha				
• Documentación que detalle cambios en el diseño y en la administración				
• Comunicaciones, tanto internas como con las comunidades de interés				
2.2. Objetivos				
Desarrollar criterios y procedimientos para asegurar que la construcción de la instalación de relaves:				
• Se ajuste al diseño				
• Cumpla con requisitos regulatorios, políticas y normas de la compañía, prácticas medioambientales y técnicas responsables y compromisos asumidos con las comunidades de interés				
• Facilite la retirada del servicio y el cierre definitivo posteriores				
• Proporcione protección continua del medio ambiente y de la salud y la seguridad públicas				
• Permita que se alcance el desempeño especificado				
Definir procedimientos para la comunicación entre el equipo de construcción y con la administración y las comunidades de interés				
Identificar requisitos para la documentación				
Identificar requisitos respecto de conocimientos y de capacidades (concienciación, capacitación y competencia profesional)				
Preparar planos detallados para la construcción de la instalación de relaves con el fin de:				
• Establecer un sistema de control de calidad para la construcción				
• Identificar y revisar cambios respecto del diseño				
• Elaborar planos de cómo se hizo e informes de construcción				

• Asegurar disponibilidad de la cantidad y calidad adecuadas de materiales para la construcción				
• Instalar instrumentación				
• Cumplir con los objetivos medioambientales				
• Obtener todos los permisos requeridos para la construcción				
• Especificar los requisitos obligatorios para los contratistas				
• Establecer los procedimientos de licitación para los contratistas				
2.3. Manejo para el cumplimiento				
Compilar y llevar un registro de la legislación aplicable, las regulaciones, los permisos y los compromisos				
Asegurar que se comprendan la legislación aplicable, las regulaciones, los permisos y los compromisos				
Asegurar que se comprendan las acciones necesarias para asegurar el cumplimiento				
Establecer y documentar procesos y procedimientos para asegurar el cumplimiento				
Establecer procedimientos para elaborar informes de cumplimiento y de incumplimiento				
Comunicar requisitos, procesos y procedimientos para asegurar el cumplimiento de todos los empleados				
2.4. Manejo del riesgo				
Antes de comenzar la construcción, realizar una evaluación de riesgos para la instalación, teniendo en cuenta:				
• Los riesgos asociados, con activadores potenciales y modalidades de fallo para la construcción				
• Impactos potenciales al medio ambiente, a la salud y a la seguridad públicas				
• Los parámetros de la construcción que pueden afectar los activadores y las modalidades de fallo				
Desarrollar:				
- Planes para el manejo de riesgos, a fines de minimizar la posibilidad de impactos adversos, tanto medioambientales como en la seguridad				
- Planes de contingencia				
- Planificación y reacción en caso de emergencia				
Que incluyan:				
- Estrategias de control para administrar los riesgos identificados o para volver a evaluar el diseño				

- Identificación de límites para dar inicio a la implementación de Planes de contingencia y de reacción en caso de emergencia				
- Procedimientos de comunicación				
2.5. Manejo del cambio				
Preparar y documentar procedimientos para asegurar que se mantenga la integridad del sistema de administración y los diseños y los planes aprobados, mediante la gestión de:				
• Cambios en personal, roles y responsabilidades				
• Cambios, incluyendo los temporales, realizados a planes y a procedimientos aprobados				
• Cambios en requisitos regulatorios				
2.6. Recursos y programación				
Identificar requisitos presupuestarios y asegurar recursos humanos y financieros adecuados para la construcción				
Desarrollar un programa de fechas para la construcción				
Actualizar los requisitos de recursos para operaciones, retirada del servicio y cierre definitivo				
2.7. Planificación y reacción en caso de emergencia				
Desarrollar y mantener la planificación y reacción en caso de emergencia para identificar situaciones potenciales de accidente o de emergencia, para reaccionar ante situaciones de emergencia y para evitar y mitigar los impactos medioambientales y de seguridad asociados con situaciones de emergencia, dentro y fuera del emplazamiento				
Establecer procedimientos para revisión, pruebas y distribución periódica de la planificación y reacción en caso de emergencia dentro de la organización y para participantes externos que potencialmente pudieran verse afectados				
3. Implementación del plan				
3.1. Control de la construcción				
Conformar un equipo cualificado y asignar responsabilidades para la construcción de la instalación de relaves				
Obtener aprobaciones y permisos				
Implementar control de administración para:				
• Asegurar conformidad con: especificaciones de diseños y de planos, prácticas técnicas y medioambientales adecuadas, manejo de riesgos, el marco de trabajo para la administración				

de relaves y compromisos asumidos con las comunidades de interés				
• Asegurar que se cumplan la legislación, las regulaciones, los permisos y los compromisos				
• Manejar riesgos				
• Manejar cambios				
• Identificar, evaluar el impacto y documentar cambios respecto de: diseño, planos, procedimientos, programa de fechas y presupuesto aprobados y asegurar que las modificaciones estén sujetas a los procesos de aprobación pertinentes				
Controlar e inspeccionar los trabajos, con el propósito de:				
• Comparar las condiciones de campo reales con las presunciones del diseño				
• Determinar que se ajusten a los objetivos				
• Evaluar el desempeño respecto del medio ambiente, de la salud y de la seguridad de la construcción				
• Identificar, documentar e informar sobre las deficiencias de la construcción y las condiciones inusuales o inseguras				
Implementar y, de manera periódica, realizar pruebas a los planes de contingencia y a la planificación y reacción en caso de emergencia				
3.2. Control financiero				
Establecer un presupuesto y controles financieros				
Obtener la aprobación del presupuesto para los trabajos				
Comparar los costos operativos y el capital con los presupuestados				
3.3. Documentación				
Preparar, mantener y de manera periódica examinar y revisar los documentos requeridos para la construcción de la instalación de relaves				
Mantener versiones actualizadas de todos los documentos en lugares designados, de fácil acceso, incluyendo:				
• Permisos, licencias y otros requisitos regulatorios				
• Presentaciones a las agencias regulatorias				
• Diseños y planos de la instalación				
• Registros de capacitación				
• Informes de control de calidad; informes, fotos, videos, etc. de la construcción				
• Resultados y análisis de controles				

• Condiciones inusuales o especiales				
• Condiciones encontradas				
• Planos y registros de cómo se hizo				
• Modificaciones al diseño y a los planes operativos de la instalación de relaves				
• Comunicaciones con las comunidades de interés				
Retirar rápidamente del uso y archivar las versiones obsoletas de documentos				
3.4. Capacitación, concientización y competencia profesional				
Contratar personal cualificado				
Asegurar que todo el personal comprenda:				
• La intención del diseño				
• Los riesgos e impactos potenciales del trabajo respecto de la salud, la seguridad y el medio ambiente				
• Las medidas apropiadas para minimizar riesgos e impactos				
Identificar las necesidades de capacitación, capacitar de la manera adecuada y llevar registros de toda la capacitación impartida				
3.5. Comunicaciones				
Implementar procedimientos documentados para las comunicaciones				
• Entre el personal operativo de relaves				
• Con la administración				
• Con las comunidades de interés				
4. Comprobación y acción correctiva				
4.1. Comprobación				
Inspeccionar, revisar y auditar la construcción para asegurar que cumplen con los requisitos regulatorios y que se ajustan a los objetivos, a los planes y a los compromisos del diseño				
Considerar una revisión independiente del diseño y de la construcción en caso de que se susciten problemas durante la construcción				
Documentar e informar de inmediato al responsable oficial designado todas las observaciones y las recomendaciones que surjan con motivo de revisiones, auditorías y evaluaciones que específicamente identifiquen asuntos que requieran una acción correctiva				
4.2. Acción correctiva				

Desarrollar e implementar planes de acción para ocuparse de temas que requieran una acción correctiva				
Documentar la finalización de las acciones correctivas				
5. Revisión anual de administración de relaves para la mejora continua				
Realizar una revisión anual de administración de relaves para:				
• Evaluar el desempeño del sistema de administración de relaves, teniendo en cuenta informes sobre inspecciones, auditorías y evaluaciones; circunstancias que hayan cambiado; resultados de los controles; derrames y otros incidentes; recomendaciones y el compromiso con la mejora continua				
• Evaluar si las políticas, los objetivos y el desempeño del sistema de administración de relaves siguen siendo adecuados o si se deben realizar cambios				
• Tratar la necesidad de cambios en los compromisos asumidos con las comunidades de interés				
Informar las observaciones y las conclusiones de esta revisión anual de administración de relaves al director ejecutivo responsable				

Tabla 4.4 Lista de comprobación para la operación

Acción administrativa	Responsabilidad	Medida de desempeño	Programa de fechas	Referencias
1. Política y compromiso				
Operar la instalación de relaves de manera tal que todas las estructuras sean estables, todos los sólidos y las aguas se gestionen dentro de las áreas designadas y todos los aspectos de la administración de relaves cumplan con los requisitos regulatorios y se ajusten a las prácticas técnicas responsables, estándares de la compañía, el marco de trabajo para la administración de relaves y compromisos asumidos con las comunidades de interés				
Asegurar que el marco de trabajo para la administración de relaves se implemente mediante las acciones de todos los empleados que trabajan en la instalación				
Consultar con las comunidades de interés, teniendo en cuenta sus consideraciones con respecto a la construcción de la instalación de relaves				
Establecer un programa permanente de revisión y de mejora continua, a fines de manejar los riesgos de salud, de seguridad y medioambientales asociados con las instalaciones de relaves				
2. Planificación				
2.1. Roles y responsabilidades				
Asignar responsabilidad general con respecto a la administración de relaves a un director ejecutivo de la compañía (gerente general o gerente de operaciones), con responsabilidad para implementar una estructura administrativa adecuada y para asegurar a la organización y a sus comunidades de interés que las instalaciones de relaves se manejan con responsabilidad				
Asignar responsabilidad y autoridad respecto del presupuesto para la administración de relaves				
Definir los roles, las responsabilidades y las relaciones para la emisión de informes para la operación de la instalación de relaves, con descripciones de los puestos de trabajo y de organigramas, incluyendo:				
• Administración del proyecto				
• Planes operativos				

• Estrategia operativa				
• Obtención y mantenimiento de aprobaciones				
• Operación de la instalación de relaves, incluyendo mantenimiento y vigilancia				
• Protección de la salud, de la seguridad y del medio ambiente				
• Planificación y reacción en caso de emergencia				
• Ayuda permanente de expertos				
• Documentación, incluyendo cambios al diseño y a la administración				
• Comunicaciones, tanto internas como con las comunidades de interés sobre:				
- Temas de desempeño de rutina				
- Preparación para emergencias				
- Elaboración de informes sobre cumplimiento regulatorio o sobre incidentes				
- Plan de cierre definitivo				
2.2. Objetivos				
Desarrollar criterios y procedimientos para asegurar que la operación de la instalación de relaves:				
• Se ajuste al diseño				
• Cumpla con requisitos regulatorios, políticas y normas de la compañía, prácticas medioambientales y técnicas responsables y compromisos asumidos con las comunidades de interés				
• Integren la preparación para la retirada del servicio y el cierre definitivo posteriores a las operaciones en curso, a fines de garantizar:				
- Protección de la salud y de la seguridad pública				
- Mitigación de impactos medioambientales negativos				
- Uso aceptable posterior al cierre definitivo, dentro de un marco de trabajo técnico y económico viable				
• Proporcionar protección continua del medio ambiente y de la salud y| la seguridad pública				
• Permitir que se alcance el desempeño especificado				
Definir procedimientos para la comunicación entre el equipo de construcción y con la administración y las comunidades de interés				
Identificar requisitos para la documentación				

Identificar requisitos respecto de conocimientos y de capacidades (concienciación, capacitación y competencia profesional)				
Plan para la operación y revisión de documentos del diseño, requisitos regulatorios, planos de cómo se hizo la construcción, planes conceptuales de operaciones y de cierre definitivo, evaluación medioambiental y compromisos asumidos con las comunidades de interés				
Preparar, revisar y actualizar, de manera periódica, un manual de operación, mantenimiento y vigilancia para la instalación incluyendo:				
• Plan de deposición de relaves				
• Plan de administración y de balance del agua				
• Plan de calidad del agua				
• Plan de mantenimiento para las obras mecánicas y civiles y para los dispositivos electrónicos				
• Plan para descargas de contaminantes				
• Plan de control y supervisión del medio ambiente				
• Plan de control de la estabilidad de la represa				
• Programa de calibración para la instrumentación clave				
• Plan de planificación y reacción en caso de emergencia				
• Plan de retirada del servicio y cierre definitivo, incluyendo rehabilitación progresiva				
2.3. Manejo para el cumplimiento				
Compilar y llevar un registro de la legislación aplicable, las regulaciones, los permisos y los compromisos				
Asegurar que se comprendan la legislación aplicable, las regulaciones, los permisos y los compromisos				
Asegurar que se comprendan las acciones necesarias para asegurar el cumplimiento				
Establecer y documentar procesos y procedimientos para asegurar el cumplimiento				
Establecer procedimientos para elaborar informes de cumplimiento y de incumplimiento				
Comunicar requisitos, procesos y procedimientos para asegurar el cumplimiento de todos los empleados				
2.4. Manejo del riesgo				
Preparar y actualizar periódicamente una evaluación de riesgos global para la instalación, con el objeto de:				

• Evaluar los riesgos asociados, con activadores potenciales y modalidades de fallo para las etapas de operación y de cierre definitivo				
• Identificar impactos potenciales al medio ambiente, a la salud y a la seguridad pública				
• Determinar los parámetros de la construcción que pueden afectar los activadores y las modalidades de fallo				
Desarrollar:				
- Planes para el manejo de riesgos, a fines de minimizar la posibilidad de impactos adversos, tanto medioambientales como en la seguridad				
- Planes de contingencia				
- Planificación y reacción en caso de emergencia				
Que incluyan:				
- Estrategias de control para administrar los riesgos identificados o para volver a evaluar el diseño				
- Identificación de límites para dar inicio a la implementación de planes de contingencia y de reacción en caso de emergencia				
- Procedimientos de comunicación				
2.5. Manejo del cambio				
Preparar y documentar procedimientos para asegurar que se mantenga la integridad del sistema de administración y los diseños y los planes aprobados, mediante la gestión de:				
• Cambios en personal, roles y responsabilidades				
• Cambios, incluyendo los temporales, realizados a planes y a procedimientos aprobados				
• Cambios en requisitos regulatorios				
2.6. Recursos y programación				
Identificar requisitos presupuestarios y asegurar recursos humanos y financieros adecuados para operar la instalación, incluyendo:				
• Operaciones, mantenimiento y vigilancia				
• Inspección, revisión, auditoría y evaluación				
Desarrollar un programa de fechas para operar la instalación				
Periódicamente, actualizar los requisitos de recursos para la retirada del servicio y el cierre definitivo				
2.7. Planificación y reacción en caso de emergencia				

Desarrollar y mantener la planificación y reacción en caso de emergencia para identificar situaciones potenciales de accidente o de emergencia, para reaccionar ante situaciones de emergencia y para evitar y mitigar los impactos medioambientales y de seguridad asociados con situaciones de emergencia, dentro y fuera del emplazamiento				
Establecer procedimientos para revisión, pruebas y distribución periódica de la planificación y reacción en caso de emergencia dentro de la organización y para participantes externos que potencialmente pudieran verse afectados				
3. Implementación del plan				
3.1. Control operativo				
Conformar un equipo cualificado y asignar responsabilidades para la construcción de la instalación de relaves				
Obtener aprobaciones y permisos				
Implementar control de administración para:				
• Aplicar el manual de operación, mantenimiento y vigilancia para la instalación				
• Asegurar conformidad con: especificaciones de diseños y de planos, prácticas técnicas y medioambientales adecuadas, manejo de riesgos, el marco de trabajo para la administración de relaves y compromisos asumidos con las comunidades de interés				
• Asegurar que se cumplan la legislación, las regulaciones, los permisos y los compromisos				
• Manejar riesgos				
• Manejar cambios				
• Identificar, evaluar el impacto y documentar cambios respecto de: diseño, planos, procedimientos, programa de fechas y presupuesto aprobados y asegurar que las modificaciones estén sujetas a los procesos de aprobación pertinentes				
Implementar el manual de operación, mantenimiento y vigilancia para la instalación, incluyendo:				
• Procedimientos y controles operativos que cubran:				
- Balance del agua				
- Calidad del agua				
- Aguas subterráneas, régimen de presión en los poros e infiltraciones				
- Características y deposición de relaves				

- Polvo				
- Impactos medioambientales				
- Seguridad del emplazamiento				
- Protección de la flora y de la fauna				
• Inspección, control, pruebas, evaluación y elaboración de informes de rutina de:				
- Cumplimiento de objetivos operativos				
- Cumplimiento de requisitos y de compromisos				
- Desempeño respecto del medio ambiente y de la seguridad				
- Deficiencias, condiciones inusuales o inseguras				
Implementar y, de manera periódica, realizar pruebas a los planes de contingencia y a la planificación y reacción en caso de emergencia				
3.2. Control financiero				
Establecer un presupuesto y controles financieros				
Obtener la aprobación del presupuesto para la administración de relaves				
Comparar los costos operativos y el capital con los presupuestados				
3.3. Documentación				
Preparar, mantener y de manera periódica examinar y revisar los documentos requeridos para operar la instalación de relaves				
Mantener versiones actualizadas de todos los documentos en lugares designados, de fácil acceso, incluyendo:				
• Permisos, licencias y otros requisitos regulatorios				
• Diseños y planos de la instalación				
• Presentaciones a las agencias regulatorias				
• Registros de capacitación				
• El manual de operación, mantenimiento y vigilancia				
• Informes de control de calidad; informes, fotos, videos, etc. de la construcción y la operación				
• Resultados y análisis de controles				
• Condiciones inusuales o especiales				
• Condiciones encontradas				
• Planos y registros de cómo se hizo				
• Modificaciones al diseño y a los planes operativos de la instalación de relaves				
• Comunicaciones con las comunidades de interés				

Retirar rápidamente del uso y archivar las versiones obsoletas de documentos				
3.4. Capacitación, concientización y competencia profesional				
Contratar personal cualificado				
Asegurar que todo el personal comprenda:				
• La intención del diseño				
• Los parámetros y los procedimientos de operación, mantenimiento y vigilancia				
• Los riesgos e impactos potenciales del trabajo respecto de la salud, la seguridad y el medio ambiente				
• Las medidas apropiadas para minimizar riesgos e impactos				
Identificar las necesidades de capacitación, capacitar de la manera adecuada y llevar registros de toda la capacitación impartida				
3.5. Comunicaciones				
Implementar procedimientos documentados para las comunicaciones				
• Entre el personal operativo de relaves				
• Con la administración				
• Con las comunidades de interés				
4. Comprobación y acción correctiva				
4.1. Comprobación				
Además de los controles y de las inspecciones de rutina, llevar a cabo una inspección periódica de las operaciones para asegurar que cumplen con los requisitos regulatorios y que se ajustan a los objetivos, a los planes y a los compromisos del diseño				
Llevar a cabo una revisión periódica de la instalación de relaves con el objeto de:				
• Comparar las presunciones del diseño con las condiciones y con el desempeño reales				
• Revisar o actualizar el diseño o los planes operativos				
• Re-evaluar los riesgos aguas abajo				
• Actualizar la evaluación de riesgos				
• Evaluar la necesidad de cambios o de actualizaciones a los planes de manejo de riesgos, planes de contingencia, planificación y reacción en caso de emergencia y planes para la retirada del servicio y el cierre definitivo posteriores				
De manera periódica, auditar y evaluar todo el sistema de administración de relaves				

Documentar e informar de inmediato al responsable oficial designado todas las observaciones y las recomendaciones que surjan con motivo de revisiones, auditorías y evaluaciones que específicamente identifiquen asuntos que requieran una acción correctiva				
4.2. Acción correctiva				
Desarrollar e implementar planes de acción para ocuparse de temas que requieran una acción correctiva, incluyendo cambios a los programas de inspección y de revisión, según sea necesario, después de efectuar cambios en el diseño o en los parámetros operativos fundamentales				
Documentar la finalización de las acciones correctivas				
5. Revisión anual de administración de relaves para la mejora continua				
Realizar una revisión anual de administración de relaves para:				
• Evaluar el desempeño del sistema de administración de relaves, teniendo en cuenta informes sobre inspecciones, auditorías y evaluaciones; circunstancias que hayan cambiado; resultados de los controles; derrames y otros incidentes; recomendaciones y el compromiso con la mejora continua				
• Evaluar si las políticas, los objetivos y el desempeño del sistema de administración de relaves siguen siendo adecuados o si se deben realizar cambios				
• Tratar la necesidad de cambios en los compromisos asumidos con las comunidades de interés				
Informar las observaciones y las conclusiones de esta revisión anual de administración de relaves al director ejecutivo responsable				

Tabla 4.5 Lista de comprobación para la retirada del servicio y cierre definitivo

Acción administrativa	Responsabilidad	Medida de desempeño	Programa de fechas	Referencias
1. Política y compromiso				
Retirar del servicio y cerrar definitivamente la instalación de relaves de modo tal que todas las estructuras que queden sean estables, todos los sólidos y las aguas se gestionen dentro de las áreas designadas y todos los aspectos de la administración de relaves cumplan con los requisitos regulatorios y se ajusten a las prácticas técnicas responsables, estándares de la compañía, el marco de trabajo para la administración de relaves y compromisos asumidos con las comunidades de interés				
Asegurar que el marco de trabajo para la administración de relaves se implemente mediante las acciones de todos los empleados que trabajan en la instalación				
Consultar con las comunidades de interés, teniendo en cuenta sus consideraciones con respecto a la instalación de relaves retirada del servicio y cierre definitivo				
Establecer un programa permanente de revisión y de mejora continua, a fines de manejar los riesgos de salud, de seguridad y medioambientales asociados con las instalaciones de relaves				
2. Planificación				
2.1. Roles y responsabilidades				
Asignar responsabilidad general con respecto a la administración de relaves a un director ejecutivo de la compañía (gerente general o gerente de operaciones), con responsabilidad para implementar una estructura administrativa adecuada y para asegurar a la organización y a sus comunidades de interés que las instalaciones de relaves se manejan con responsabilidad				
Asignar responsabilidad y autoridad respecto del presupuesto para la administración de relaves				
Definir los roles, las responsabilidades y las relaciones para la emisión de informes para la operación de la instalación de relaves, con descripciones de los puestos de trabajo y de organigramas, incluyendo:				
• Administración del proyecto				

• Plan de cierre definitivo				
• Obtención y mantenimiento de aprobaciones				
• Retirada del servicio y cierre definitivo				
• Cuidado y mantenimiento a largo plazo				
• Protección de la salud, de la seguridad y del medio ambiente				
• Planificación y reacción en caso de emergencia				
• Ayuda permanente de expertos				
• Documentación, incluyendo cambios al diseño y a la administración				
• Aseguramiento de solidez financiera				
• Comunicaciones, tanto internas como con las comunidades de interés sobre:				
- Plan de cierre definitivo				
- Temas de desempeño de rutina				
- Preparación para emergencias				
- Elaboración de informes sobre cumplimiento regulatorio o sobre incidentes				
2.2. Objetivos				
Desarrollar criterios y procedimientos para asegurar que la retirada del servicio y el cierre definitivo de la instalación de relaves:				
• Se ajuste al diseño				
• Proporcionar protección continua del medio ambiente y de la salud y la seguridad pública				
• Mitiguen impactos medioambientales negativos				
• Cumpla con requisitos regulatorios, políticas y normas de la compañía, prácticas medioambientales y técnicas responsables y compromisos asumidos con las comunidades de interés				
• Habiliten la entrega o la transferencia de tierra para usos distintos a los de minería, consistentes con los objetivos regionales de uso de la tierra o de usos aprobados, o proporcionar cuidado y mantenimiento a largo plazo				
• Aseguren la estabilidad a largo plazo de relaves, represas e instalaciones y estructuras relacionadas				
Definir procedimientos para la comunicación entre el equipo de construcción y con la administración y las comunidades de interés				
Identificar requisitos para la documentación				

Identificar requisitos respecto de conocimientos y de capacidades (concienciación, capacitación y competencia profesional)				
Planear la retirada del servicio y el cierre definitivo y revisar documentos del diseño, requisitos regulatorios, planos de cómo se construyó y de cómo opera, planes conceptuales de retirada del servicio y cierre definitivo, evaluación medioambiental y compromisos asumidos con las comunidades de interés				
Preparar, revisar y actualizar, de manera periódica, un manual de operación, mantenimiento y vigilancia para la instalación incluyendo:				
• Plan de administración y de balance del agua				
• Plan de calidad del agua				
• Plan de mantenimiento para las obras mecánicas y civiles y para los dispositivos electrónicos				
• Plan para descargas de contaminantes				
• Plan de control y supervisión del medio ambiente				
• Plan de control de la estabilidad de la represa				
• Programa de calibración para la instrumentación clave				
• Plan de planificación y reacción en caso de emergencia				
• Plan de retirada del servicio y cierre definitivo				
• Programa de fechas del programa de rehabilitación para las instalaciones que ya no se requieran				
Repasar el plan aprobado de retirada del servicio y cierre definitivo para:				
• Identificar y evaluar nuevas preocupaciones medioambientales que hayan resultado evidentes desde la aprobación del plan				
• Identificar y evaluar impactos medioambientales potenciales que pueden ser causados por la ejecución del cierre definitivo				
• Evaluar tecnologías alternativas para el cierre definitivo				
Revisar la ejecución de la reclamación progresiva hasta la fecha				
2.3. Manejo para el cumplimiento				
Compilar y llevar un registro de la legislación aplicable, las regulaciones, los permisos y los compromisos				
Asegurar que se comprendan la legislación aplicable, las regulaciones, los permisos y los compromisos				
Asegurar que se comprendan las acciones necesarias para asegurar el cumplimiento				

Establecer y documentar procesos y procedimientos para asegurar el cumplimiento				
Establecer procedimientos para elaborar informes de cumplimiento y de incumplimiento				
Comunicar requisitos, procesos y procedimientos para asegurar el cumplimiento de todos los empleados				
2.4. Manejo del riesgo				
Preparar y actualizar periódicamente una evaluación de riesgos global para la instalación, con el objeto de:				
• Evaluar los riesgos asociados, con activadores potenciales y modalidades de fallo.				
• Identificar impactos potenciales al medio ambiente, a la salud y a la seguridad pública				
• Determinar los parámetros de la construcción que pueden afectar los activadores y las modalidades de fallo				
Desarrollar:				
- Planes para el manejo de riesgos, a fines de minimizar la posibilidad de impactos adversos, tanto medioambientales como en la seguridad				
- Planes de contingencia				
- Planificación y reacción en caso de emergencia				
Que incluyan:				
- Estrategias de control para administrar los riesgos identificados o para volver a evaluar el diseño				
- Identificación de límites para dar inicio a la implementación de planes de contingencia y de reacción en caso de emergencia				
- Procedimientos de comunicación				
2.5. Manejo del cambio				
Preparar y documentar procedimientos para asegurar que se mantenga la integridad del sistema de administración y los diseños y los planes aprobados, mediante la gestión de:				
• Cambios en personal, roles y responsabilidades				
• Cambios, incluyendo los temporales, realizados a planes y a procedimientos aprobados				
• Cambios en requisitos regulatorios				
2.6. Recursos y programación				

Identificar requisitos presupuestarios y asegurar recursos humanos y financieros adecuados para operar la instalación, incluyendo:				
• Operaciones, mantenimiento y vigilancia				
• Inspección, revisión, auditoría y evaluación				
• Solidez financiera				
Desarrollar un programa de fechas para operar la instalación				
2.7. Planificación y reacción en caso de emergencia				
Desarrollar y mantener la planificación y reacción en caso de emergencia para identificar situaciones potenciales de accidente o de emergencia, para reaccionar ante situaciones de emergencia y para evitar y mitigar los impactos medioambientales y de seguridad asociados con situaciones de emergencia, dentro y fuera del emplazamiento				
Establecer procedimientos para revisión, pruebas y distribución periódica de la planificación y reacción en caso de emergencia dentro de la organización y para participantes externos que potencialmente pudieran verse afectados				
3. Implementación del plan				
3.1. Control del cierre definitivo				
Conformar un equipo cualificado y asignar responsabilidades para la retirada del servicio y el cierre definitivo de la instalación de relaves.				
Obtener aprobaciones y permisos				
Implementar control de administración para:				
• Aplicar el manual de operación, mantenimiento y vigilancia para la retirada del servicio y el cierre definitivo de la instalación.				
• Asegurar conformidad con: especificaciones de diseños y de planos, prácticas técnicas y medioambientales adecuadas, manejo de riesgos, el marco de trabajo para la administración de relaves y compromisos asumidos con las comunidades de interés				
• Asegurar que se cumplan la legislación, las regulaciones, los permisos y los compromisos				
• Manejar riesgos				
• Manejar cambios				
• Identificar, evaluar el impacto y documentar los cambios efectuados a planos, procedimientos, programas de fechas y				

presupuestos aprobados y asegurar que las modificaciones estén sujetas a los procesos de aprobación pertinentes				
Implementar y, de manera periódica, realizar pruebas a los planes de contingencia y a la planificación y reacción en caso de emergencia				
3.2. Control financiero				
Establecer un presupuesto y controles financieros				
Obtener la aprobación del presupuesto para la retirada del servicio y el cierre definitivo				
Comparar los costos operativos y el capital con los presupuestados				
Comparar los costos reales y las actualizaciones del presupuesto con la solidez financiera del cierre definitivo				
3.3. Documentación				
Preparar, mantener y de manera periódica examinar y revisar los documentos requeridos para la retirada del servicio y el cierre definitivo de la instalación de relaves				
Mantener versiones actualizadas de todos los documentos en lugares designados, de fácil acceso, incluyendo:				
• Permisos, licencias y otros requisitos regulatorios				
• Planes de retirada del servicio y cierre definitivo				
• Presentaciones a las agencias regulatorias				
• Registros de capacitación				
• Informes de control de calidad; informes, fotos, videos, etc. de la construcción y la operación				
• Resultados y análisis de controles				
• Condiciones encontradas				
• Planos y registros de cómo se hizo				
• Modificaciones al diseño, a la operación, al plan de retirada del servicio y al cierre definitivo de la instalación de relaves				
• Comunicaciones con las comunidades de interés				
Retirar rápidamente del uso y archivar las versiones obsoletas de documentos				
3.4. Capacitación, concientización y competencia profesional				
Contratar personal cualificado				
Asegurar que todo el personal comprenda:				
• La intención del diseño de la retirada del servicio y del cierre definitivo				

• Los parámetros y los procedimientos de operación, mantenimiento y vigilancia				
• Los riesgos e impactos potenciales del trabajo respecto de la salud, la seguridad y el medio ambiente				
• Las medidas apropiadas para minimizar riesgos e impactos				
Identificar las necesidades de capacitación, capacitar de la manera adecuada y llevar registros de toda la capacitación impartida				
3.5. Comunicaciones				
Implementar procedimientos documentados para las comunicaciones				
• Entre el personal operativo de relaves				
• Con la administración				
• Con las comunidades de interés				
4. Comprobación y acción correctiva				
4.1. Comprobación				
Además de los controles y de las inspecciones de rutina, llevar a cabo una inspección periódica de las operaciones para asegurar que cumplen con los requisitos regulatorios y que se ajustan a los objetivos, a los planes y a los compromisos del diseño				
Llevar a cabo una revisión periódica de la instalación de relaves con el objeto de:				
• Comparar las presunciones del diseño con las condiciones y con el desempeño reales				
• Revisar o actualizar el diseño o los planes de la retirada del servicio y de cierre definitivo				
• Re-evaluar los riesgos aguas abajo				
• Actualizar la evaluación de riesgos				
• Evaluar la necesidad de cambios o de actualizaciones a los planes de manejo de riesgos, a los planes de contingencia y a la planificación y reacción en caso de emergencia				
De manera periódica, auditar y evaluar todo el sistema de administración de relaves				
Documentar e informar de inmediato al responsable oficial designado todas las observaciones y las recomendaciones que surjan con motivo de revisiones, auditorías y evaluaciones que específicamente identifiquen asuntos que requieran una acción correctiva				
4.2. Acción correctiva				

Desarrollar e implementar planes de acción para ocuparse de temas que requieran una acción correctiva, incluyendo cambios a los programas de inspección y de revisión, según sea necesario, después de efectuar cambios en el diseño o en los parámetros operativos fundamentales				
Documentar la finalización de las acciones correctivas				
5. Revisión anual de administración de relaves para la mejora continua				
Realizar una revisión anual de administración de relaves para:				
• Evaluar el desempeño del sistema de administración de relaves, teniendo en cuenta informes sobre inspecciones, auditorías y evaluaciones; circunstancias que hayan cambiado; resultados de los controles; derrames y otros incidentes; recomendaciones y el compromiso con la mejora continua				
• Evaluar si las políticas, los objetivos y el desempeño del sistema de administración de relaves siguen siendo adecuados o si se deben realizar cambios				
• Tratar la necesidad de cambios en los compromisos asumidos con las comunidades de interés				
Informar las observaciones y las conclusiones de esta revisión anual de administración de relaves al director ejecutivo responsable				

CAPÍTULO V

DISCUCIÓN Y RESULTADOS

5.1. Presa de relaves Chinchan

La siguiente figura muestra el perfil de la presa de Chinchan con su cresta en la cota 4476 msnm, el talud de la presa de relave grueso aguas abajo es de 2 a 1, estos parámetros de estabilidad aseguran que se cumple con el diseño mediante mediciones topográficas precisas y regulares; el análisis de estabilidad por equilibrio límite se realizó para: falla a través del relave, falla a través de la cimentación y falla a través del desmonte mina (ver anexo 01) esta estabilidad fue auditada en la última supervisión realizada por Osinergmin, donde no se encontraron observaciones.

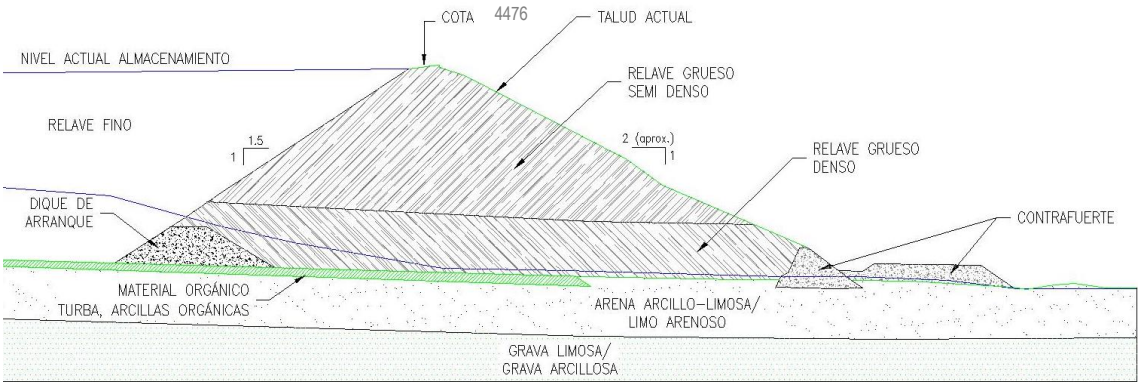


Figura 5.1 Perfil de la presa de relaves Chinchan

El ciclo de vida de un depósito de relaves puede ocurrir en una sucesión lineal o cíclica, con las siguientes etapas:

1. Conceptualización, planificación y diseño del proyecto
2. Construcción inicial
3. Operación y construcción continua (puede incluir la recuperación progresiva)
4. Cierre temporal (incluyendo cuidado y mantenimiento)
5. Cierre (re-perfilamiento, demolición y recuperación)

6. Post cierre (incluye transmisión de la responsabilidad, reprocesamiento, reubicación, remoción).

El siguiente análisis se ha realizado en la etapa actual del depósito de relaves que es el de operación y construcción continua.

5.2. Análisis de rotura de presa

Se desarrolló un análisis de rotura de presa considerando los *modos creíbles de falla*, las condiciones del emplazamiento y las propiedades de los relaves. Un modo creíble de falla se refiere a los *mecanismos de falla* técnicamente factibles considerando los materiales presentes en la estructura y en su fundación, las propiedades de esos materiales, la configuración de la estructura, las condiciones del drenaje y el control de aguas superficiales en la instalación.

Para el análisis se consideraron los modos de falla potenciales para la presa, su fundación, los estribos, el depósito (de relaves y laguna de aguas claras), el perímetro y las estructuras auxiliares del reservorio para minimizar el riesgo según el principio del *nivel más bajo razonablemente factible (ALARP*). Este análisis se requiere para establecer la clasificación por consecuencias de la falla.

Resultando la falla de presa por perdida de resistencia por licuación de relaves como el modo creíble de falla más relevante para un clima sin lluvias en la operación y falla de presa por overtopping (incremento del agua en el vaso que sobrepasaría el dique principal) para un clima con lluvia, entre todos los modos de falla potenciales para la presa, a los que le aplicaremos la metodología BowTie.

Para elegir los modos creíbles de falla primero se establecieron los mecanismos de falla para la presa agrupados en dos:

Grupo 1 (*Rainy day* = días lluviosos): Es el colapso producido por rebose o overtopping se considera una alta cantidad de agua en la cubeta o vaso del depósito, consecuencia de ello el nivel del agua se eleva tanto que pasa el nivel de cresta de la presa y el agua se vierte sobre el talud de la presa aguas abajo lo que provoca una erosión continua y la falla de la presa, liberando también el relave del depósito.

Factores asociados: tormentas no previstas en el diseño, inapropiado borde libre, capacidad de descarga disponible es inadecuada o es instalada inadecuadamente.

Grupo 2 (*Sunny day* = días sin lluvias en la operación):

- Los colapsos por fallas en la cimentación (se pierde la base).
- Colapso por tubificación: falla en el sistema de impermeabilización de la presa, la presión del agua va lavando los finos de la presa, se produce una brecha la cual se incrementa en el tiempo y produce el colapso de la presa.
- Colapso por carga sísmica, la presa falla por el movimiento sísmico (un sismo no esperado).
- Colapso por el cracking, debido a fallas asociadas a las cárcavas formadas por tormentas ordinarias, si las cárcavas no son reparadas en el tiempo, afectan la estabilidad de la presa (perdida de la configuración o geometría inicial de la presa).
- Colapso por licuación de relaves: asociado al agua que ingresa a la presa (presa con finos) y por un movimiento lo que era sólido se convierte en un fluido y la presa colapsa.

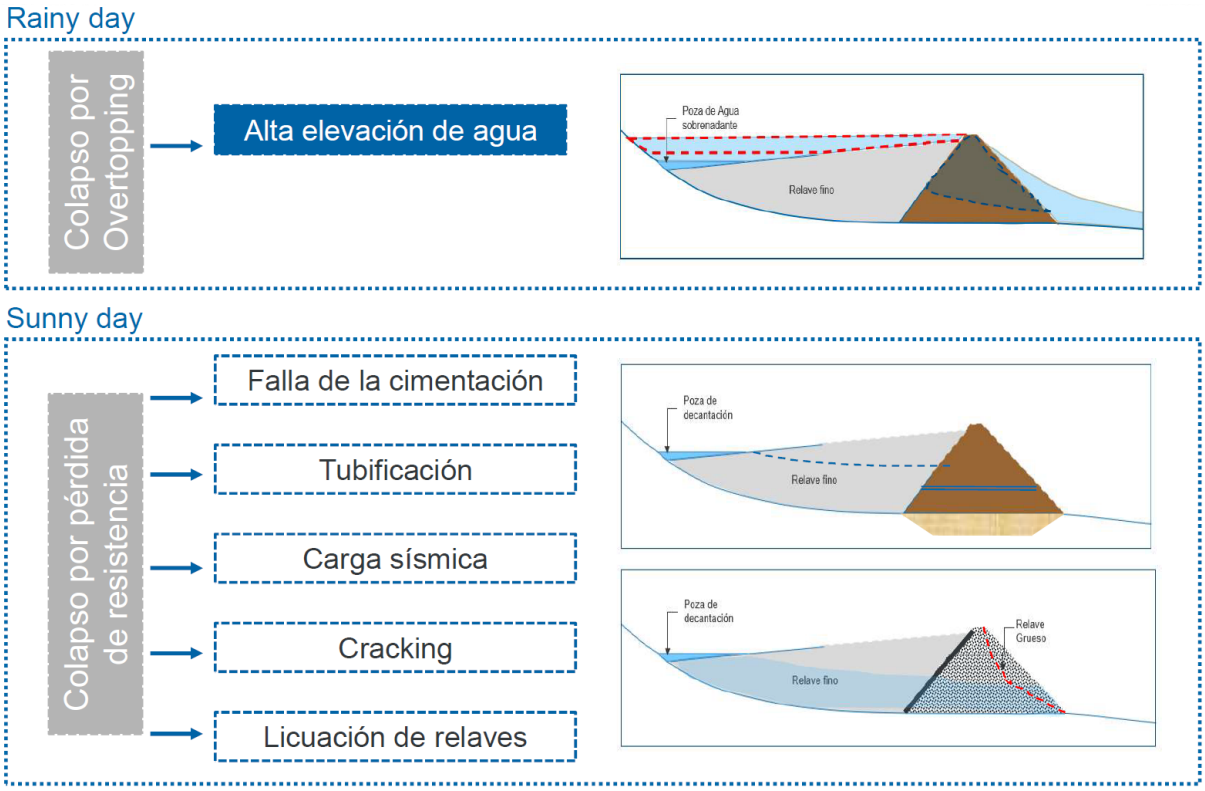


Figura 5.2 Mecanismos de falla

Fuente: Tomado del Seminario web “Consideraciones para el análisis de rotura de presas de relaves” Miguel Huaman Aguilar – Anddes Asociados SAC – octubre 2020

Los peligros y riesgos asociados (modo creíble de falla), encontrados durante eventos extremos que afectan al depósito de relaves, se evaluaron usando la *metodología de árbol de fallos y sucesos indicadores* (BowTie) y una matriz típica de probabilidad - consecuencia similar a la que se muestra en la siguiente figura:

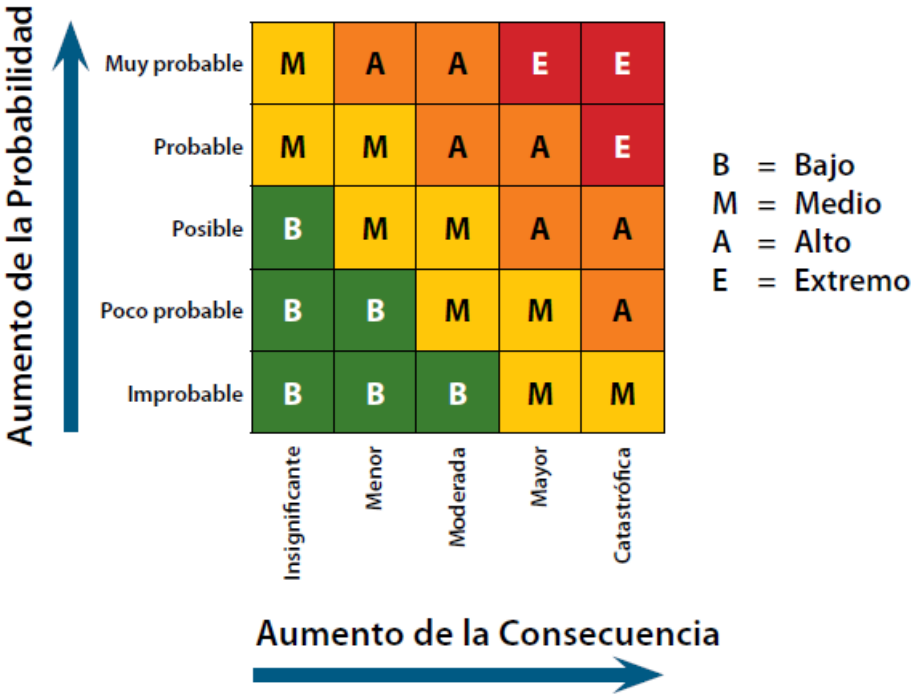


Figura 5.3 Ejemplo de una típica matriz de evaluación de riesgos cualitativa

Fuente: Adaptado de *A Guide to the Management of Tailings Facilities,* [Figure A.1.1 *Sample of a typical qualitative risk assessment matrix*] (p.43) *Third Edition (2017)* The Mining Association of Canada

5.2.1. Aplicación de la metodología de árbol de fallos y sucesos indicadores (BowTie) para el riesgo catastrófico por falla de presa

El BowTie como método de análisis de riesgos contribuye al estudio y diseño preventivo de barreras y controles preventivos y de contención en diferentes niveles de la organización. Desde los procesos directivos responsables de factores organizacionales hasta los de supervisión de la empresa.

BowTie utiliza un diagrama que visualiza el análisis del riesgo en una sola imagen, fácil de entender, creando una diferenciación clara entre la gestión de riesgos proactiva y reactiva.

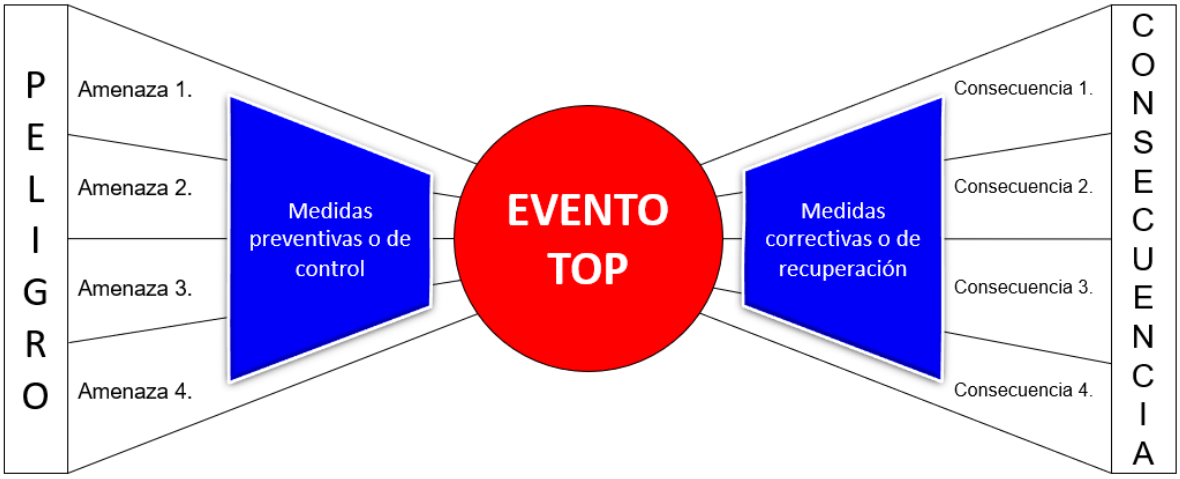


Figura 5.4 Diagrama básico BowTie

El diagrama BowTie es una representación de las relaciones entre todos los factores para un escenario de riesgo elevado, muestra la relación entre: peligros, amenazas, controles, medidas de recuperación y consecuencias.

A continuación, se describen los elementos del BowTie para el evento no deseado especifico: pérdida de contención del dique principal de la presa de relaves.

Peligros: son las entradas, provenientes del análisis, como: cualquier sustancia, condición, actividad humana u otro agente peligroso que pueda causar daños, pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, pérdida de la integridad de estructuras naturales construidas, daños a la propiedad, pérdida de medios de subsistencia o servicios, trastornos sociales y económicos, o daños al medio ambiente, los peligros para el evento no deseado especifico pérdida de contención del dique principal de la presa de relaves, son los siguientes:

El incremento del agua en el vaso que sobrepasaría el dique principal (overtopping).

Eventos sísmicos de intensidad extraordinaria.

Dique principal saturado con agua subterránea y de infiltración de lluvias

Amenazas: Son los mecanismos (causas posibles) que pueden liberar el peligro, las amenazas para el evento específico no deseado especifico: pérdida de contención del dique principal de la presa de relaves, son los siguientes:

- Diseño inadecuado de la presa de relaves.
- Construcción inadecuada de la presa de relaves.
- Operación inadecuada de la presa de relaves

- Mantenimiento inadecuado de equipos e infraestructura hidráulica de la presa de relaves.
- Lluvias extraordinarias
- Movimientos sísmicos

Medidas preventivas o de control: Son las barreras implementadas para evitar que las amenazas liberen un peligro. Las medidas de control para evitar el evento no deseado especifico: pérdida de contención del dique principal de la presa de relaves, son los siguientes:

- Selección de empresa proveedora de servicios de diseño, especializada y habilitada por la autoridad gubernamental.
- Selección de empresa proveedora, especializada en servicios de construcción.
- Supervisión y control de calidad para asegurar el cumplimiento de los parámetros de diseño.
- Ejecución de la Gestión de Cambios para el manejo de las desviaciones que puedan surgir en la ejecución del diseño antiguo y actual.
- Autorización de construcción otorgada por la autoridad gubernamental (DGM)
- Aseguramiento de que la información post construcción de la presa de relaves esté siempre disponible para los fines de la organización.
- Autorización de funcionamiento de la relavera otorgada por la autoridad gubernamental (DGM).
- Supervisión regular e inopinada de la autoridad gubernamental (OSINERGMIN, OEFA, ANA)
- Inspección y mantenimiento mecánico de los equipos de bombeo de agua de contacto: bombas de laguna de aguas claras, bombas de drenes, grupo electrógeno.
- Inspección y mantenimiento de las instalaciones eléctricas del sistema de bombeo de agua de contacto: tableros eléctricos industriales, subestación eléctrica, grupo electrógeno.
- Servicio de un Ingeniero de Registros (EoR) *.

* EoR: Engineer of Record, un ingeniero de registros es el responsable del diseño y la construcción de las instalaciones del depósito de relaves.

- Inspección y mantenimiento de los equipos de control electrónico, sensores de nivel de agua, alarmas de nivel de agua, arranque remoto y cámaras de videovigilancia.
- Inspección y mantenimiento de la infraestructura hidráulica para el agua de no contacto, bocatomas, canales de derivación, túnel de derivación.
- Inspección y mantenimiento de la infraestructura hidráulica para el agua de contacto, pozas de derivación, tuberías de conducción.
- Sistemas de bombeo para la evacuación de agua de contacto e instrumentos de monitoreo de caudal.
- Generador eléctrico para abastecimiento de energía a las bombas de la laguna de aguas claras y drenes en caso de contingencia por corte de la energía del sistema interconectado.
- Ejecución de inspección y mantenimiento de los equipos e infraestructura hidráulica de la presa de relaves.
- Recopilación actualizada de parámetros operacionales y ejecución de estudio de verificación de la estabilidad de la presa.

Controles críticos: son aquellos controles que son críticos para prevenir un evento indeseado potencial o para mitigar sus consecuencias. La ausencia o la falla de un control crítico aumentaría el riesgo de manera desproporcionada, a pesar de la existencia de otros controles. Los controles críticos para evitar el evento no deseado especifico: pérdida de contención del dique principal de la presa de relaves, son los siguientes:

- Equipos de bombeo de agua de contacto (sistema mecánico, eléctrico y electrónico)
- Cumplimiento de los parámetros geométricos del diseño de la presa: inclinación del talud, altura del borde libre, ancho de corona, longitud de playa.
- Cumplimiento de los parámetros operacionales del diseño de la presa: granulometría de la fracción gruesa de relave para la conformación de la presa, manejo de agua de contacto, manejo de agua de no contacto.
- Cumplimiento de los procedimientos operativos del depósito de relaves.
- Monitoreo de los parámetros geotécnicos del diseño de la presa: piezómetros, hitos topográficos.

- Monitoreo con acelerógrafo.
- Inspección y mantenimiento de los equipos de instrumentación geotécnica: piezómetros, acelerógrafo.
- Infraestructura hidráulica para evacuación del agua de no contacto: bocatomas, canales de derivación, túnel de derivación.
- Estructuras de desviación frente a la crecida extraordinaria del caudal de diseño.

El evento top: Es el momento en que se pierde del control sobre el peligro, para nuestro análisis es: **pérdida de contención del dique principal de la presa de relaves**. Esta descripción se convierte en el nudo en el centro del BowTie; la descripción del evento top debería describir el sistema cuando ha pasado de ser seguro a inseguro.

El evento top descrito es una falla catastrófica del depósito de relaves que produce una alteración importante en los sistemas sociales, ambientales y de economía local. La falla catastrófica está en función de la interacción entre la exposición y la vulnerabilidad ante el peligro y la capacidad de las personas y los sistemas de generar una respuesta. Los eventos catastróficos en general implican numerosos impactos adversos de diferentes escalas a lo largo de distintos lapsos de tiempo incluyendo, la pérdida de vidas, daños en infraestructuras físicas y bienes naturales, alteración de la vida, los medios de subsistencia y el orden social. El titular de la actividad minera puede verse afectado por daños en sus bienes, alteración de las operaciones, en el área financiera o un impacto negativo en su reputación. Las fallas catastróficas exceden la capacidad de las personas afectadas de hacer frente a la situación utilizando sus propios recursos, provocando la necesidad de contar con asistencia externa para los esfuerzos de respuesta ante la emergencia, su restauración y recuperación.

Medidas correctivas o de recuperación: Son todas las medidas que limitan las consecuencias una vez que el evento top ha ocurrido. Las medidas de control implementadas para evitar el evento no deseado especifico pérdida de contención del dique principal de la presa de relaves, son los siguientes:

- Revisión y actualización del plan de emergencia y contingencias del sistema de relaves.
- Entrenamiento a personal de la zona de influencia, a través de simulacros periódicos.
- Sistemas de alarma, alerta y rutas de evacuación en caso de emergencia en la zona de influencia.
- Acuerdos de colaboración con organizaciones externas: INDECI, COER, DEVIANDES, SARCC.
- Plan de remediación ambiental preestablecido por impacto de falla de presa de relaves.
- Plan de reconstrucción de la presa de relaves.

Consecuencias: Son los eventos o cadena de eventos que resultan de la liberación de un peligro, las consecuencias para el evento específico no deseado especifico: pérdida de contención del dique principal de la presa de relaves, son los siguientes:

- Fatalidad múltiple y lesiones
- Impacto ambiental severo
- Deterioro de la imagen institucional
- Daño severo a la infraestructura del depósito de presa de relaves
- Paralización prolongada de operaciones
- Pago de indemnizaciones y multas

Finalmente, con este análisis utilizando la metodología BowTie logramos lo siguiente:

- Una descripción del evento no deseado, así como sus amenazas y consecuencias.
- La identificación de los controles que previenen el evento no deseado.
- La identificación de los controles que mitigan las consecuencias del evento no deseado.
- La identificación de los factores que pueden hacer que los controles fallen o que puedan socavar su efectividad.
- Un análisis de la confiabilidad de los controles.

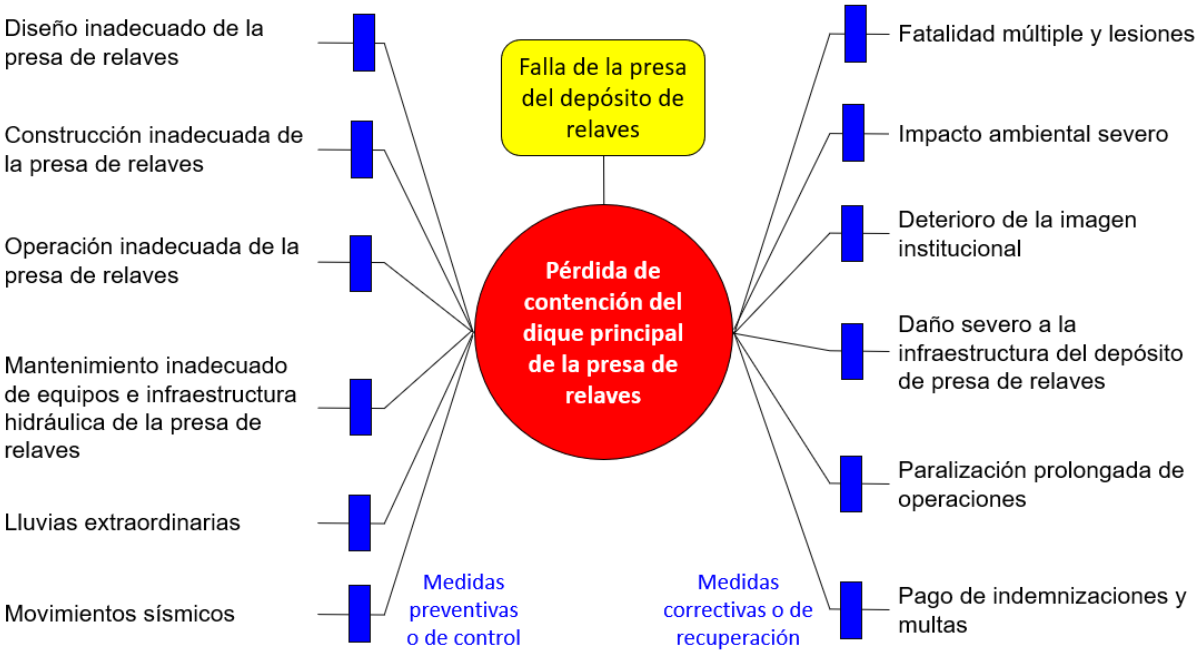


Figura 5.5 Amenazas y consecuencias para el evento top

5.3. Clasificación por consecuencias de la falla

Se determinó la clasificación por consecuencia de fallas de la instalación de relaves mediante la evaluación de las condiciones aguas abajo utilizando la matriz de clasificación por consecuencias del Estándar global de gestión de relaves para la industria minera (2020) de International Council on Mining & Metal (ICMM). La matriz mencionada clasifica las consecuencias de falla de presas en: baja, significativa, alta, muy alta y extrema. Se evalúa en términos de su posible efecto en una de las siguientes categorías:

1. Población potencial en riesgo
2. Pérdida potencial de vidas
3. Medio ambiente
4. Salud, ámbito cultural y social
5. Infraestructura y economía

El área geográfica ubicada aguas bajo de la presa de relaves Chinchan alberga el cause naciente del río Rímac, tierras de pastoreo comunales, vías de transporte terrestre y ferroviario, centros poblados, residencia de trabajadores e instalaciones industriales, con potencial de generar 5 o más fatalidades en caso de pérdida de contención del dique principal de la presa, de donde la clasificación por consecuencia resulto como “Alta” debido a la exposición de los seres humanos y su vulnerabilidad frente a escenarios creíbles de falla de instalaciones de relaves.

Clasificación por consecuencia de fallas de presas	Población potencial en riesgo	Pérdida potencial de vidas	
Baja	Ninguna	Ninguna esperada	
Significativa	1-10	Sin especificar	
Alta	10-100	posible 1 - 10	
Muy alta	100-1000	probable 10 - 100	
Extrema	>1000	Muchos (más de 100)	

Pérdidas incrementales			
	Medio ambiente	**Salud, ámbito cultural y social**	**Infraestructura y economía**
	A corto plazo, mínima pérdida o deterioro de hábitat o de especies raras y en peligro de extinción.	Efectos mínimos e interrupción ligera de las actividades económicas y medios de subsistencia. Ningún efecto medible sobre la salud humana. Ninguna alteración del patrimonio, o los bienes comunitarios, culturales o recreativos.	Pérdidas económicas bajas; el área contiene escasa infraestructura o servicios. <USD 1M
	Ninguna pérdida o deterioro de hábitat significativos. Potencial contaminación del suministro de agua para ganado o fauna sin efectos en la salud. Aguas de proceso de baja toxicidad potencial. Relaves sin potencial generación de ácido y con bajo potencial de lixiviación neutra. Restauración posible en un plazo de 1 a 5 años.	Interrupción significativa de actividades económicas y servicios, o desintegración del tejido social. Baja probabilidad de pérdida de patrimonio o bienes comunitarios, culturales o recreativos regionales. Baja probabilidad de efectos en la salud.	Pérdidas en instalaciones recreativas, lugares de trabajo estacionales y rutas de transporte de uso poco frecuente. <USD 10M
	Significativa pérdida o deterioro de hábitat crítico o de especies raras y en peligro de extinción. Potencial contaminación del suministro de agua para ganado o fauna sin efectos en la salud. Agua de proceso moderadamente tóxica. Bajo potencial de drenaje ácido de roca o de efectos de lixiviación de metales en los relaves liberados. Área potencial de impacto, 10 - 20 km². Restauración posible, pero difícil y podría llevar > 5 años.	500-1000 personas afectadas por interrupción de la actividad económica y de los servicios, o por desintegración del tejido social. Perturbación del patrimonio regional, de los bienes comunitarios o culturales, instalaciones recreativas. Posibilidad de efectos en la salud humana a corto plazo.	Grandes pérdidas económicas que afectan la infraestructura, el transporte público, las instalaciones comerciales o el empleo. Moderada reubicación o indemnización a las comunidades. <USD 100M
	Importante pérdida o deterioro de hábitat crítico o de especies raras y en peligro de extinción. Aguas de proceso altamente tóxicas. Alta posibilidad de drenaje ácido de roca o de efectos de lixiviación de metales de relaves liberados. Área potencial de impacto >20 km². Restauración o indemnización posible, pero muy difícil, y se requiere de un largo período (5 a 20 años).	>1000 personas afectadas por interrupción de la actividad económica y de los servicios, o por desintegración del tejido social durante más de un año. Significativa destrucción de patrimonio nacional, de instalaciones comunitarias o bienes culturales. Posibilidad de efectos significativos en la salud humana a largo plazo.	Pérdidas económicas muy grandes, que afectan a importantes obras de infraestructura o servicios (por ejemplo, autopistas, instalaciones industriales, instalaciones de almacenamiento de sustancias peligrosas) o el empleo. Importante reubicación/compensación para las comunidades. <USD 1B
	Pérdida catastrófica de hábitat crítico o de especies raras y en peligro de extinción. Aguas de proceso altamente tóxicas. Muy alta posibilidad de drenaje ácido de roca o de efectos de lixiviación de metales de relaves liberados. Área potencial de impacto >20 km². Imposible restauración o compensación en especie o se requiere de un largo período (>20 años).	>5000 personas afectadas por interrupción de la actividad económica y de los servicios, o por desintegración del tejido social durante años. Significativa destrucción de patrimonio o de instalaciones comunitarias o bienes cultural a nivel nacional. Posibilidad de efectos graves en la salud humana y/o a largo plazo.	Pérdidas económicas extremas que afectan la infraestructura o los servicios críticos (por ejemplo, hospitales, complejos industriales importantes, grandes depósitos de almacenamiento de sustancias peligrosas) o el empleo. Reubicación/compensación muy importannte a las comunidades y costos de reajuste social muy altos. >USD 1B

Tabla 5.1. Matriz de clasificación por consecuencias

Fuente: Tomado de *Global Industry Standard on Tailings Management*, [Table 1: *Consequence Classification Matrix*] (p.34) *First Edition* (2020)

International Council on Mining & Metal (ICMM)

Figura 5.6 Imagen de la presa de relaves Chinchan en operación

5.4. Estadísticas de incidentes

El siguiente gráfico muestra de forma cuantitativa la cantidad de incidentes de seguridad y ambientales ocurridos desde julio del 2020, notándose un decremento de la cantidad de incidentes hasta llegar a cero accidentes durante cuatro meses continuos, todos estos resultados debidos a la mejora de la gestión para la presa de relaves Chinchan.

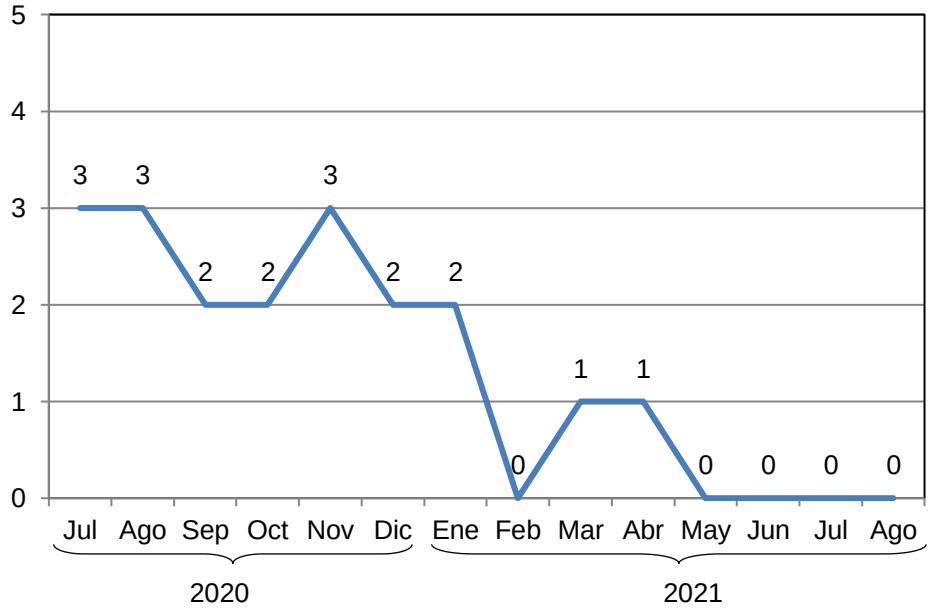


Gráfico 5.1 Estadísticas de incidentes en la presa de relaves Chinchan

5.5. Planes de respuesta de acción desencadenante

En caso de falla catastrófica en una instalación de relaves, se dará una respuesta inmediata para salvar vidas, suministrar ayuda humanitaria y reducir al mínimo los daños en el medio ambiente.

El plan de acción y respuesta de activación que tiene niveles de activación definidos para los indicadores de desempeño que se basan en los controles críticos de la instalación de relaves. El plan describe acciones predefinidas de gestión de riesgos que se deben tomar si se exceden los niveles de activación para evitar una pérdida de control. Se describe una serie de niveles de riesgo cualitativo en aumento para cada indicador de desempeño. Para cada indicador de desempeño y en cada nivel de riesgo existen acciones de gestión de riesgos predefinidas. El número de los niveles de riesgo dependen del indicador de desempeño, el plan de gestión de riesgos y los controles críticos. El marco de cuatro niveles de riesgo es:

Verde - situación aceptable: El desempeño está en línea con los objetivos de desempeño.

Amarillo: situación de riesgo menor: Puede haber una acción de gestión de riesgos predefinida que o la acción predefinida puede ser aumentar la frecuencia de la vigilancia y el análisis. Pueden emprenderse otras actividades de vigilancia. Los resultados de la vigilancia y las acciones correspondientes son documentados e informados.

Naranja - situación de riesgo moderado: Se implementan acciones de gestión de riesgos predefinidas. Las actividades de vigilancia pueden intensificarse para monitorear el indicador de desempeño en cuestión, relacionado criterios de desempeño, y la efectividad de la acción de gestión de riesgos implementada. Se implementan acciones y se documentan los resultados de las actividades de vigilancia de seguimiento. La acumulación o combinación de situaciones de riesgo moderado podría dar lugar a una situación de alto riesgo y los valores umbral deberán evaluarse en consecuencia.

Rojo - situación de alto riesgo: Ha ocurrido una pérdida inminente de control o una pérdida de control. Dependiendo de la consecuencia potencial, esto puede desencadenar un riesgo predefinido muy significativo.

El concepto de definir los niveles de riesgo se ilustra en la siguiente figura.

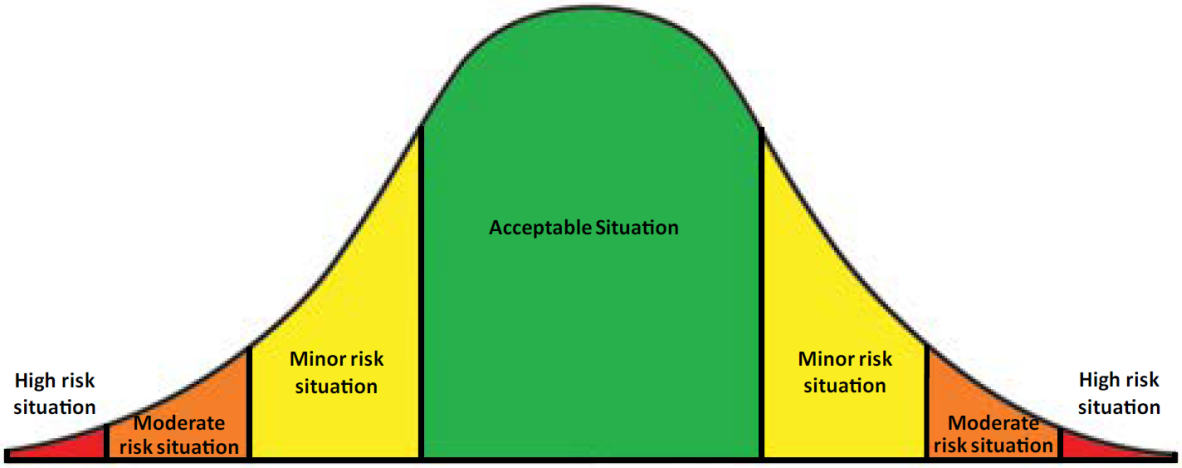


Figura 5.7 Ilustración del concepto de definición de niveles de riesgo

Fuente: Tomado de *Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities,* [Figure A.3.1 *Illustration of the concept of defining risk levels to establish TARPs*] (p.56) *Second Edition (2019)* The Mining Association of Canada

CONCLUSIONES

1. La mejora de la gestión de la presa del depósito de relaves permitió que se reduzca la cantidad de incidentes de seguridad y ambientales ocurridos desde julio del 2020, notándose un decremento de la cantidad de incidentes hasta llegar a cero accidentes durante cuatro meses continuos.

2. Entre todos los modos de falla potenciales para la presa, los modos de falla creíbles más relevantes son dos:

- Falla de presa por pérdida de resistencia por licuación de relaves como el modo creíble de falla más relevante para un clima sin lluvias en la operación o sunny day.
- Falla de presa por rebose o overtopping (incremento del agua en el vaso que sobrepasaría el dique principal) para un clima con lluvias o rainy day.

  El evento top para ambos modos creíbles de falla, que es el momento en que se pierde del control sobre el peligro, cuya descripción se convierte en el nudo en el centro del BowTie es:

  "Pérdida de contención del dique principal de la presa de relaves"

3. Con la metodología de árbol de fallos y sucesos indicadores (BowTie) se logró identificar:

   Amenazas o mecanismos (causas posibles) que pueden liberar el peligro:

   - Diseño inadecuado de la presa de relaves.
   - Construcción inadecuada de la presa de relaves.
   - Operación inadecuada de la presa de relaves
   - Mantenimiento inadecuado de equipos e infraestructura hidráulica de la presa de relaves.
   - Lluvias extraordinarias
   - Movimientos sísmicos

   Consecuencias o los eventos que resultan de la liberación del peligro:

   - Fatalidad múltiple y lesiones
   - Impacto ambiental severo

- Deterioro de la imagen institucional
- Daño severo a la infraestructura del depósito de presa de relaves
- Paralización prolongada de operaciones
- Pago de indemnizaciones y multas

RECOMENDACIONES

1. Realizar la simulación de rotura de presa utilizando modelos numéricos, hallar el hidrograma de descarga y el comportamiento del flujo de relaves.

2. En caso de una emergencia en las instalaciones del depósito de relaves, el ingeniero de registro (EoR) debe ser requerido para inspeccionar el problema y presentar un plan de acción de manera oportuna para cada situación subestándar o problema específico que genere la emergencia.

3. Para ayudar a la mejora continua del modelo de gestión en el tiempo se deben realizar auditorías y evaluar la eficacia del sistema de administración de relaves, al terminar la auditoría se deberá realizar el seguimiento de todas las áreas de riesgos o de debilidades potenciales en el diseño o la implementación del sistema de administración que se identificaron durante la auditoría o la evaluación de un sistema de administración.

4. Mantener un dialogo abierto con las comunicades de interés, teniendo en cuenta sus consideraciones y necesidades con respecto a la administración de las instalaciones de relaves.

5. Con el fin de disminuir el nivel del riesgo y salvaguardar la vida de los trabajadores durante su traslado del trabajo a su domicilio y viceversa se recomienda aplicar la metodología BowTie para riesgos catastróficos que permitan implementar controles efectivos y evitar la ocurrencia de lamentables accidentes como los ocurridos recientemente: el 18-06-2021 donde un vehículo de transporte de personal de la Unidad Operativa Pallancata perdió el control en la vía Puquio Nazca ocasionando una volcadura donde murieron 26 personas; el 27-08-2021 Minera Las Bambas un vehículo de transporte de personal perdió el control en la zona de Huallpachaca en Cotabambas Apurimac ocasionando una volcadura donde murieron 16 personas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Australian Goverment (2016). «*RISK MANAGEMENT Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry*» Australia 125p.
2. Autoridad Nacional del Agua (2019) «*Reglamento de seguridad de presas públicas de embalse de agua*» Perú 21p.
3. Autoridad Nacional del Agua (2017) «*Normas y reglamento de seguridad de presas en el Perú*» Perú 85p.
4. Autoridad Nacional del Agua (2015) «*Inventario de presas en el Perú*» Perú 97p.
5. Braja M. Das (2018) «*FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA*» México 636p.
6. Braja M. Das (2018) «*FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES*» México 798p.
7. De La Vega Franco, Artemio (octubre 2020) «*Supervisión de la gestión y operación de los depósitos de relaves*» I Congreso de Competitividad Minera y Sostenibilidad Social – GMS Osinergmin.
8. Donald P. Coduto (2017) «Geotechnical Engineering» USA 759p.
9. Gonzáles de Vallejo, Luis (2002). «*INGENIERÍA GEOLÓGICA*» Madrid 744p.
10. Goodman Richard E. (2001) «*INTRODUCTION TO ROCK MECHANICS*» Imperial College England 555p. 1° Edición
11. Glecore division Zinc «*Protocolos para peligros mortales*» (2018) 84p.
12. Hernandez Sampieri, C. Roberto (2014). «*METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN*» México 600p.
13. Huaman Aguilar, Miguel (octubre 2020) «*Consideraciones para el análisis de rotura de presas de relaves*» Seminario web Anddes Asociados SAC.
14. Iparraguirre Ortiz, Carlos / Huaman, Carlos (junio 2020) «*Revisión de seguridad de presas de relaves según la guía CDA (2016)*» Seminario web Anddes Asociados SAC.
15. ICMM International Council on Mining & Metal (2020) «*Global Industry Standard on Tailings Management*» First Edition 58p.
16. ICMM International Council on Mining & Metal (2015) « *Health and Safety Critical Control Management: Good practice guide* » First Edition 30p.

17. ICOLD Comisión Internacional de Grandes Presas y UNEP Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2001) Boletín número 121 «*Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences (Lessons learnt from practical experiences)*».
18. Pinto Herrera, Honorio (2010) «*Desastre ecológico y ambiental en Huancavelica*» Universidad Nacional Mayor de San Marcos - investigaciones sociales Vol.14 N°25 321-338p Perú
19. Solís S. Pedro (2000). «*Empresa Minera Yauliyacu S.A. Presa de Relaves Chinchan. Evaluación y respuesta a la estabilidad física y química e implicancias ambientales*». Universidad Nacional de Ingeniería. Tesis para obtener el título profesional de ingeniero metalurgista.
20. Suarez Diaz, Jaime (2009). «*DESLIZAMIENTOS*» Colombia 582p.
21. S.G. Vick and D. Van Zyl «*Report on Mount Polley Tailings Storage Facility Breach*», January 2015. Government of British Columbia. Asociación de minería de Canadá (1998). «*GUÍA PARA LA ADMINISTRACION DE INSTALCIONES DE RELAVERAS*» Canadá 58p.
22. The Mining Association of Canada (2019) «*Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities*» Second Edition 69p.
23. The Mining Association of Canada (2017) « *A Guide to the Management of Tailings Facilities* » Third Edition 75p.
24. Programa de asistencia técnica del ministerio de energía y minas, dirección general de asuntos ambientales (1995) «*GUIA AMBIENTAL PARA EL MANEJO DE RELAVES MINEROS*» Perú 73p.
25. SERNAGEOMIN Servicio Nacional de geología y minería (2003). «*GUIA DE BUENAS PRACTICAS AMBIENTALES PARA LA PEQUEÑA MINERIA*» Chile 14p.
26. Ministerio de ecología e ingeniería para el desarrollo – Comisión europea (2009) «*GESTIÓN DE ESTÉRILES DE ACTIVIDADES MINERAS*» Francia 632p.
27. Ministerio de integración nacional – secretaria de infraestructura hídrica (2002) «*MANUAL DE SEGURIDAD E INSPECCIÓN DE PRESAS*» Francia 612p.
http://www.elperuano.com.pe/noticia-inventario-presas-el-peru-33617.aspx
http://www.ana.gob.pe/noticia/autoridad-nacional-del-agua-presenta-estudio-inventario-de-presas-en-el-peru

Anexos

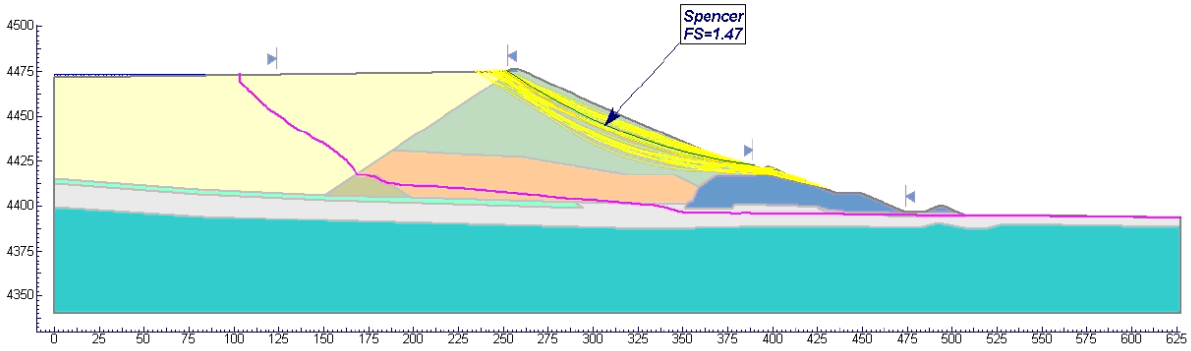
Anexo 01

Análisis de estabilidad por equilibrio límite

Análisis de Estabilidad Estático

Sección Geotécnica 1-1 (cota de corona 4476 m.s.n.m.), Falla a Través del Relave

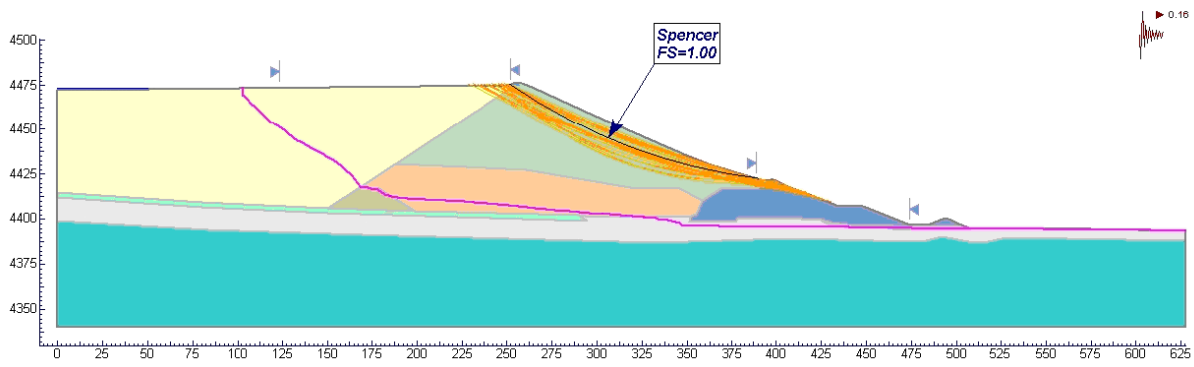
Material	γ (kN/m³)	γsat (kN/m³)	C (kPa)	ϕ (°)	W
Relave Fino No drenado	16.0	17.0	10	0	1
Relave Grueso 1	17.5	20.5	0	31	-
Relave Grueso 2	20.0	21.5	0	33	1
Dique de Arranque	20.0	21.0	0	35	1
Desmonte de Mina	20.0	21.0	0	38	-
Suelo Orgánico	16.0	17.0	0	15	1
Suelo de Cimentación 1	20.0	21.0	10	25	1
Suelo de Cimentación 2	21.0	22.0	10	32	1
Relleno Estructural	19.0	21.0	10	35	1
Grava de Drenaje	21.0	23.0	0	36	1



Análisis de Estabilidad Pseudo-Estático

Sección Geotécnica 1-1 (cota de corona 4476 m.s.n.m.), Falla a Través del Relave

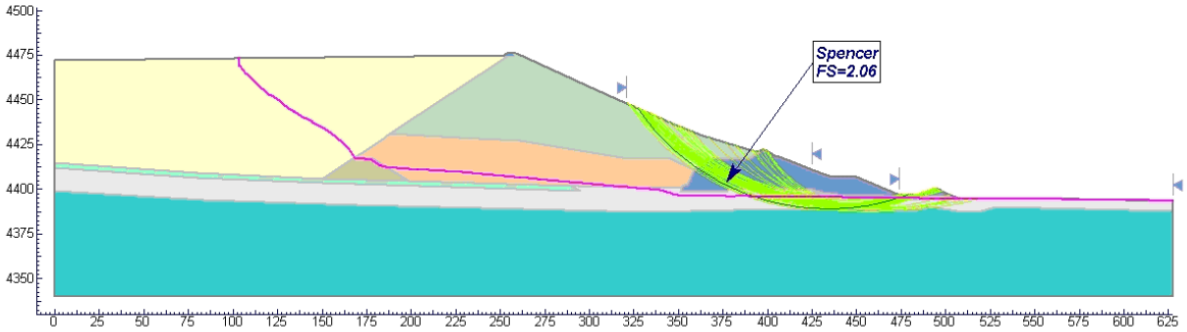
Material	γ (kN/m³)	γsat (kN/m³)	C (kPa)	ϕ (°)	W
Relave Fino No drenado	16.0	17.0	10	0	1
Relave Grueso 1	17.5	20.5	0	31	-
Relave Grueso 2	20.0	21.5	0	33	1
Dique de Arranque	20.0	21.0	0	35	1
Desmonte de Mina	20.0	21.0	0	38	-
Suelo Orgánico	16.0	17.0	0	15	1
Suelo de Cimentación 1	20.0	21.0	10	25	1
Suelo de Cimentación 2	21.0	22.0	10	32	1
Relleno Estructural	19.0	21.0	10	35	1
Grava de Drenaje	21.0	23.0	0	36	1



Análisis de Estabilidad Estático

Sección Geotécnica 1-1 (cota de corona 4476 m.s.n.m.), Falla a Través del Desmonte de Mina

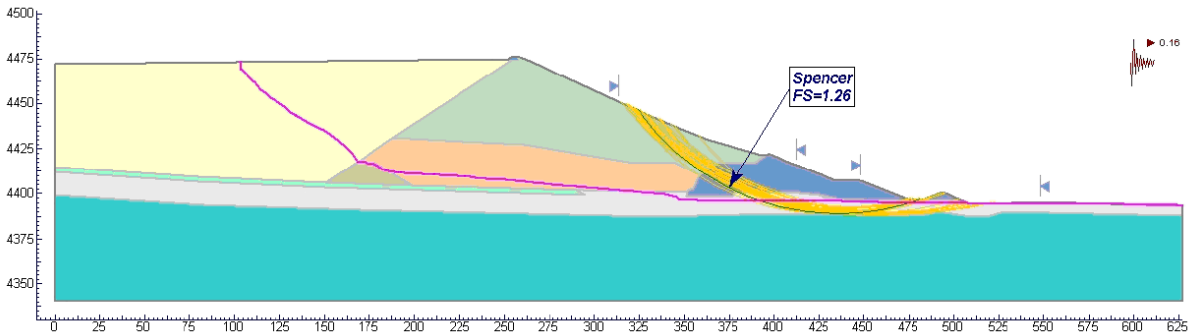
Material	γ (kN/m³)	γsat (kN/m³)	C (kPa)	ϕ (°)	W
Relave Fino No drenado	16.0	17.0	10	0	1
Relave Grueso 1	17.5	20.5	0	31	-
Relave Grueso 2	20.0	21.5	0	33	1
Dique de Arranque	20.0	21.0	0	35	1
Desmonte de Mina	20.0	21.0	0	38	-
Suelo Orgánico	16.0	17.0	0	15	1
Suelo de Cimentación 1	20.0	21.0	10	25	1
Suelo de Cimentación 2	21.0	22.0	10	32	1
Relleno Estructural	19.0	21.0	10	35	1
Grava de Drenaje	21.0	23.0	0	36	1



Análisis de Estabilidad Pseudo-Estático

Sección Geotécnica 1-1 (cota de corona 4476 m.s.n.m.), Falla a Través del Desmonte de Mina

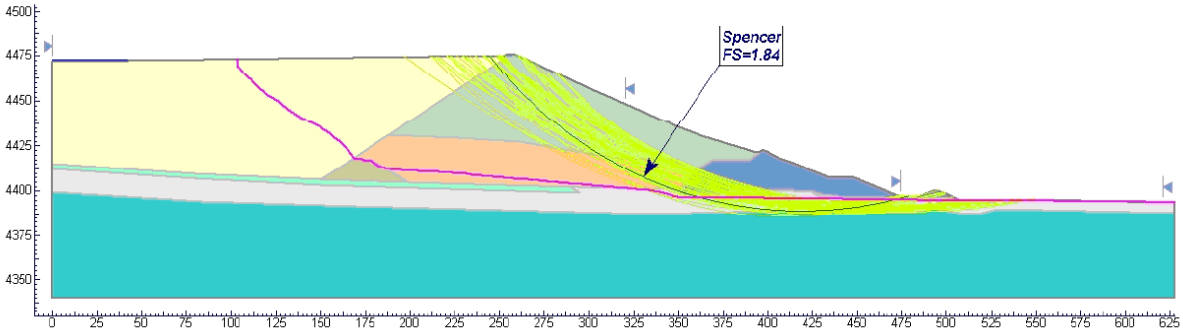
Material	γ (kN/m³)	γsat (kN/m³)	C (kPa)	ϕ (°)	W
Relave Fino No drenado	16.0	17.0	10	0	1
Relave Grueso 1	17.5	20.5	0	31	-
Relave Grueso 2	20.0	21.5	0	33	1
Dique de Arranque	20.0	21.0	0	35	1
Desmonte de Mina	20.0	21.0	0	38	-
Suelo Orgánico	16.0	17.0	0	15	1
Suelo de Cimentación 1	20.0	21.0	10	25	1
Suelo de Cimentación 2	21.0	22.0	10	32	1
Relleno Estructural	19.0	21.0	10	35	1
Grava de Drenaje	21.0	23.0	0	36	1



Análisis de Estabilidad Estático

Sección Geotécnica 1-1 (cota de corona 4476 m.s.n.m.), Falla a Través de la Cimentación

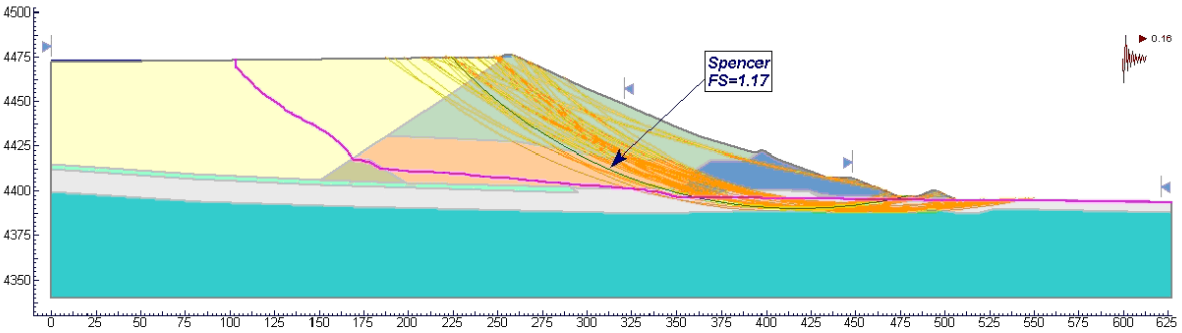
Material	γ (kN/m³)	γsat (kN/m³)	C (kPa)	ϕ (°)	W
Relave Fino No drenado	16.0	17.0	10	0	1
Relave Grueso 1	17.5	20.5	0	31	-
Relave Grueso 2	20.0	21.5	0	33	1
Dique de Arranque	20.0	21.0	0	35	1
Desmonte de Mina	20.0	21.0	0	38	-
Suelo Orgánico	16.0	17.0	0	15	1
Suelo de Cimentación 1	20.0	21.0	10	25	1
Suelo de Cimentación 2	21.0	22.0	10	32	1
Relleno Estructural	19.0	21.0	10	35	1
Grava de Drenaje	21.0	23.0	0	36	1



Análisis de Estabilidad Pseudo-Estático

Sección Geotécnica 1-1 (cota de corona 4476 m.s.n.m.), Falla a Través de la Cimentación

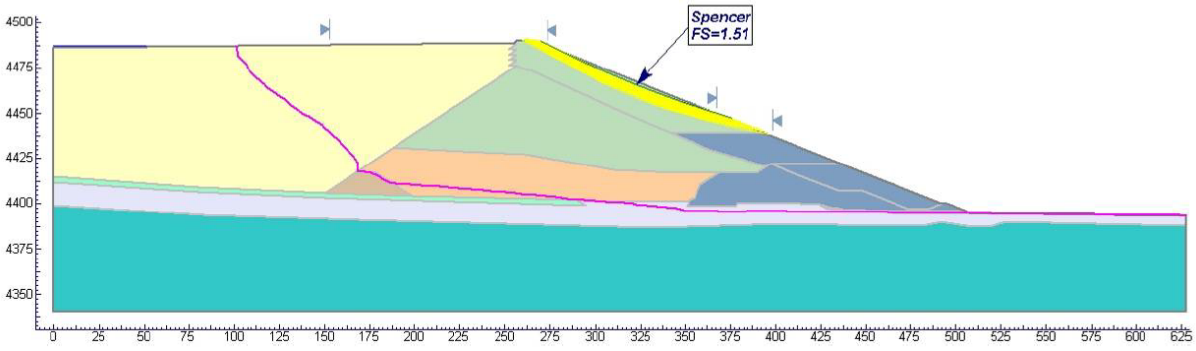
Material	γ (kN/m³)	γsat (kN/m³)	C (kPa)	ϕ (°)	W
Relave Fino No drenado	16.0	17.0	10	0	1
Relave Grueso 1	17.5	20.5	0	31	-
Relave Grueso 2	20.0	21.5	0	33	1
Dique de Arranque	20.0	21.0	0	35	1
Desmonte de Mina	20.0	21.0	0	38	-
Suelo Orgánico	16.0	17.0	0	15	1
Suelo de Cimentación 1	20.0	21.0	10	25	1
Suelo de Cimentación 2	21.0	22.0	10	32	1
Relleno Estructural	19.0	21.0	10	35	1
Grava de Drenaje	21.0	23.0	0	36	1



Análisis de Estabilidad Estático

Sección Geotécnica 1-1 Crecimiento Línea Central (cota de la corona 4490 m.s.n.m.), Falla a través del Relave

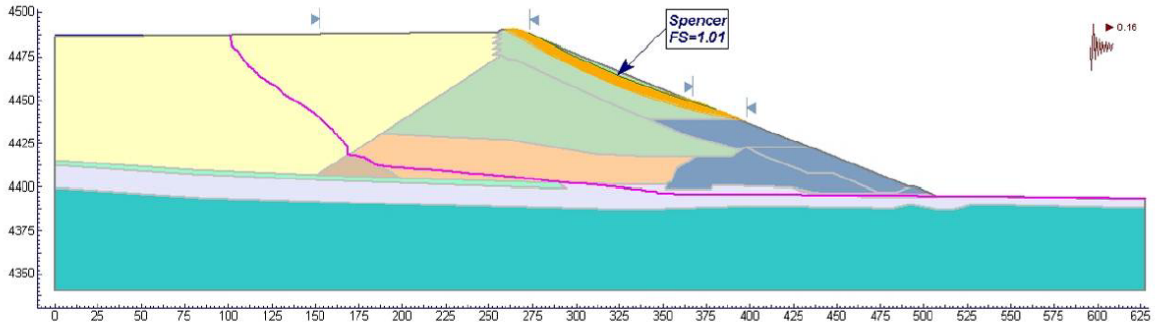
Material	γ (kN/m³)	γsat (kN/m³)	C (kPa)	ϕ (°)	W
Relave Fino No drenado	16.0	17.0	10	0	1
Relave Grueso 1	17.5	20.5	0	31	-
Relave Grueso 2	20.0	21.5	0	33	1
Dique de Arranque	20.0	21.0	0	35	1
Desmonte de Mina	20.0	21.0	0	38	-
Suelo Orgánico	16.0	17.0	0	15	1
Suelo de Cimentación 1	20.0	21.0	10	25	1
Suelo de Cimentación 2	21.0	22.0	10	32	1
Relleno Estructural	19.0	21.0	10	35	1
Grava de Drenaje	21.0	23.0	0	36	1



Análisis de Estabilidad Pseudo-Estático

Sección Geotécnica 1-1 Crecimiento Línea Central (cota de la corona 4490 m.s.n.m.), Falla a través del Relave

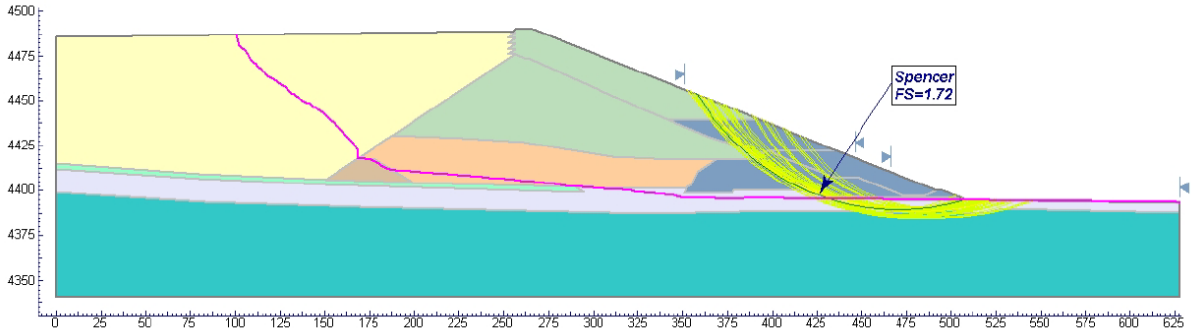
Material	γ (kN/m³)	γsat (kN/m³)	C (kPa)	ϕ (°)	W
Relave Fino No drenado	16.0	17.0	10	0	1
Relave Grueso 1	17.5	20.5	0	31	-
Relave Grueso 2	20.0	21.5	0	33	1
Dique de Arranque	20.0	21.0	0	35	1
Desmonte de Mina	20.0	21.0	0	38	-
Suelo Orgánico	16.0	17.0	0	15	1
Suelo de Cimentación 1	20.0	21.0	10	25	1
Suelo de Cimentación 2	21.0	22.0	10	32	1
Relleno Estructural	19.0	21.0	10	35	1
Grava de Drenaje	21.0	23.0	0	36	1



Análisis de Estabilidad Estático

Sección Geotécnica 1-1 Crecimiento Línea Central (cota de la corona 4490 m.s.n.m.), Falla a través del Desmonte de Mina

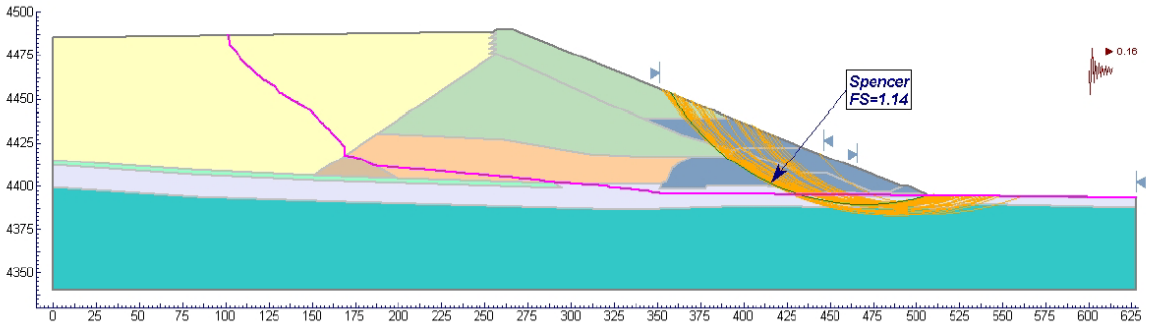
Material	γ (kN/m³)	γsat (kN/m³)	C (kPa)	ϕ (°)	W
Relave Fino No drenado	16.0	17.0	10	0	1
Relave Grueso 1	17.5	20.5	0	31	-
Relave Grueso 2	20.0	21.5	0	33	1
Dique de Arranque	20.0	21.0	0	35	1
Desmonte de Mina	20.0	21.0	0	38	-
Suelo Orgánico	16.0	17.0	0	15	1
Suelo de Cimentación 1	20.0	21.0	10	25	1
Suelo de Cimentación 2	21.0	22.0	10	32	1
Relleno Estructural	19.0	21.0	10	35	1
Grava de Drenaje	21.0	23.0	0	36	1



Análisis de Estabilidad Pseudo-Estático

Sección Geotécnica 1-1 Crecimiento Línea Central (cota de la corona 4490 m.s.n.m.), Falla a través del Desmonte de Mina

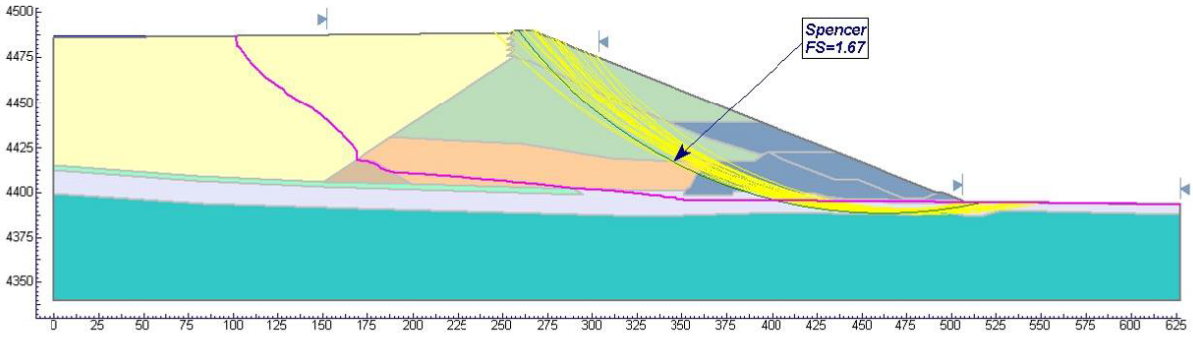
Material	γ (kN/m³)	γsat (kN/m³)	C (kPa)	ϕ (°)	W
Relave Fino No drenado	16.0	17.0	10	0	1
Relave Grueso 1	17.5	20.5	0	31	-
Relave Grueso 2	20.0	21.5	0	33	1
Dique de Arranque	20.0	21.0	0	35	1
Desmonte de Mina	20.0	21.0	0	38	-
Suelo Orgánico	16.0	17.0	0	15	1
Suelo de Cimentación 1	20.0	21.0	10	25	1
Suelo de Cimentación 2	21.0	22.0	10	32	1
Relleno Estructural	19.0	21.0	10	35	1
Grava de Drenaje	21.0	23.0	0	36	1



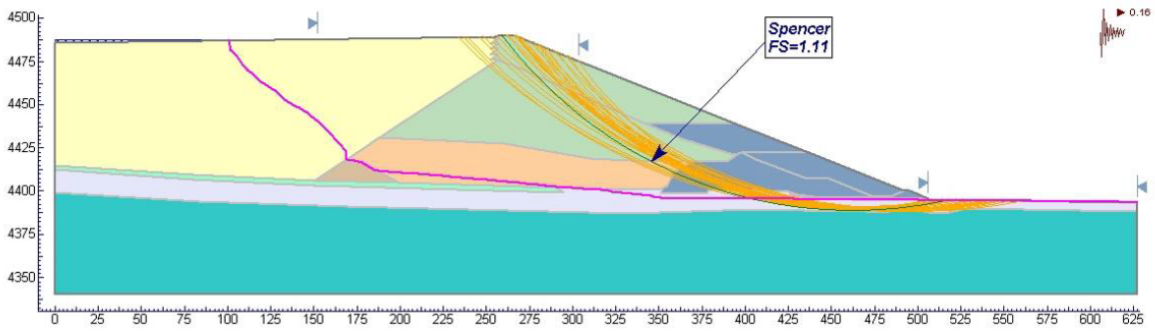
Análisis de Estabilidad Estático

Sección Geotécnica 1-1 Crecimiento Línea Central (cota de la corona 4490 m.s.n.m.), Falla a través de la Cimentación

Material	γ (kN/m³)	γsat (kN/m³)	C (kPa)	ϕ (°)	W
Relave Fino No drenado	16.0	17.0	10	0	1
Relave Grueso 1	17.5	20.5	0	31	-
Relave Grueso 2	20.0	21.5	0	33	1
Dique de Arranque	20.0	21.0	0	35	1
Desmonte de Mina	20.0	21.0	0	38	-
Suelo Orgánico	16.0	17.0	0	15	1
Suelo de Cimentación 1	20.0	21.0	10	25	1
Suelo de Cimentación 2	21.0	22.0	10	32	1
Relleno Estructural	19.0	21.0	10	35	1
Grava de Drenaje	21.0	23.0	0	36	1



Análisis de Estabilidad Pseudo-Estático

Sección Geotécnica 1-1 Crecimiento Línea Central (cota de la corona 4490 m.s.n.m.), Falla a través de la Cimentación

Material	γ (kN/m³)	γsat (kN/m³)	C (kPa)	ϕ (°)	W
Relave Fino No drenado	16.0	17.0	10	0	1
Relave Grueso 1	17.5	20.5	0	31	-
Relave Grueso 2	20.0	21.5	0	33	1
Dique de Arranque	20.0	21.0	0	35	1
Desmonte de Mina	20.0	21.0	0	38	-
Suelo Orgánico	16.0	17.0	0	15	1
Suelo de Cimentación 1	20.0	21.0	10	25	1
Suelo de Cimentación 2	21.0	22.0	10	32	1
Relleno Estructural	19.0	21.0	10	35	1
Grava de Drenaje	21.0	23.0	0	36	1