



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS DE ESTABILIDAD
FÍSICA DE DEPÓSITOS DE RELAVES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

MEILI IGNACIA CARVAJAL ARROYO

PROFESOR GUÍA
CÉSAR PASTÉN PUCHI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
CHRISTIAN IHLE BASCUÑÁN
ROBERTO GESCHE SCHÜLER

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL

TÍTULO DE: Ingeniera Civil con mención en Estructuras, Construcción y Geotecnia

POR: Meili Ignacia Carvajal Arroyo

FECHA: 26/01/2018

PROFESOR GUÍA: César Rodrigo Pastén Puchi

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS DE ESTABILIDAD FÍSICA DE DEPÓSITOS DE RELAVES

El presente trabajo de título tiene como principal objetivo proponer una metodología capaz de determinar el nivel de estabilidad física que tiene un depósito de relaves en Chile, en el contexto del Programa Tranque, iniciativa de CORFO, que busca generar tecnologías que aporten al monitoreo en línea de depósitos de relaves. Para esto se realizó una revisión de normativas nacionales e internacionales, en conjunto con manuales de buenas prácticas y documentos asociados a la operación de un depósito de relaves, con el fin de establecer el estado del arte de la verificación de estabilidad física en estas estructuras de contención. Además, se revisó el estado actual de los depósitos de relave en Chile y se analizaron las fallas ocurridas a nivel mundial, para establecer los mecanismos de falla predominantes, y los parámetros y eventos asociados a su desarrollo. La metodología propuesta consta de tres módulos, donde el nivel de dificultad aumenta en cada uno. El primero, denominado Evaluación Cualitativa, consiste en la asignación de puntaje a características físicas que son de fácil evaluación, donde la suma de estas puntuaciones, sumado a la presencia de factores agravantes, entrega un resultado. Si la evaluación cualitativa es baja, se pasa al siguiente módulo, que corresponde a la Verificación de Parámetros Críticos para cada mecanismo de falla. Si estos parámetros se encuentran dentro del umbral definido, se pasa al módulo final de Determinación del Índice de Estabilidad Física, el cual se calcula a través de un Árbol de Falla para cada mecanismo de falla. Considerando probabilidades conocidas de la bibliografía, se evalúa la sensibilidad del Índice a un cambio en sus causas raíces. La herramienta presentada en este trabajo corresponde a una. Mediante los tres módulos se busca analizar de manera completa la condición de estabilidad física, a partir de lo que se controla en Chile y el mundo, donde el primer módulo tiene características de evaluación similares a los reportes E700, el segundo módulo representa, a través de parámetros críticos, el estado del arte sobre la estabilidad física de depósitos de relaves, mientras que el tercer y último módulo corresponde a una herramienta con capacidad predictiva, lo cual no existe en la actualidad.

A mis papás y hermanas

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a las personas más importantes de mi vida: mi familia. A mis padres, Raúl y Lily, por el amor incondicional y la constante preocupación, por los valores entregados, por apoyarme en todas las decisiones que he tomado, por enseñarme que siempre hay que tirar pa' arriba y hacer que las cosas sucedan, y por formar esta hermosa familia de la que no puedo estar más orgullosa de pertenecer. A mis hermanas, Kiang y Shenxian, gracias por la paciencia, la compañía, el cariño, la preocupación y las risas constantes. Son sin duda el mejor apoyo que podría tener en Santiago. Mame, agradezco todo el amor, oraciones y preocupación que siempre me ayudaron a seguir avanzando. Gracias familia, por alegrarse con todos mis logros, levantarme cada vez que he caído y por ser el pilar fundamental de mi vida.

A mi amiga Xime, gracias por tu apoyo durante todos estos años, por tu amistad incondicional, palabras de aliento, y por confiar siempre en mí. A las zorritas: Chubi, Lore y Maka, porque a pesar de la distancia y de ser tan distintas, nos complementamos perfecto. A Diego, Braulio y Checho, porque somos amigos de la vida y ni la distancia a podido separarnos. Han sido parte importante de mi vida y les agradezco por conservar intacta la amistad y el cariño formado en el colegio, los quiero mucho.

A mis amigos de la U: Leo Camus, mi amigo desde inducción hasta el final de la carrera. Eres lo máximo, no me queda más que agradecerte por todo, has sido parte fundamental de todo mi proceso universitario. Lore y Feña, porque fueron parte muy importante de mis primeros años en la U, me hicieron sentir muy acogida y siempre seguimos en contacto. Daisy, por ser mi compañera (de cursos y carretes) durante la mayor parte de la carrera. Gracias a las tres por su linda amistad. A los mejores de civil: Nacho Toro y Nico Pino. Gracias Nacho por las extendidas conversaciones, todos los consejos y ayuda tanto en el ámbito académico como personal. Nico, gracias por la infinita paciencia en los ramos de estructuras y por ser siempre tan atento y preocupado. Son excelentes personas y amigos. A las lindas, Nico y Fany, por ser las amigas que toda mujer debería tener. Gracias por las subidas de ánimo y las eternas muestras de apoyo y amor. Javi Córdoba y Carlitos Fuentes, porque partimos siendo compañeritos de laboratorio y terminamos formando una muy bonita amistad.

A los Ignacios: Mauro, Alo, Diego y Ele, yo creo que no saben lo mucho que influyeron en mi vida. Agradezco los cahuines, las risas, los llantos y el apoyo que siempre nos dimos durante el desarrollo de nuestras memorias. Por último, agradezco a la Geopecera, quienes se sumaron al final de este proceso pero que sin duda siempre formarán parte de mi vida. Javi, Emi, José S., Nati, Magda, José F., Sole, Susi y Negro, gracias por los buenos momentos, los fotomontajes, los ataques de risa y la ayuda que siempre están dispuestos a dar.

Agradezco a mi profesor guía, César Pastén, por presentarme el área de la geotecnia a través de sus clases, por permitirme trabajar con usted, por la paciencia, la ayuda y la oportunidad de trabajar en este proyecto. A los integrantes de la comisión, gracias profesor Roberto Gesche por la confianza y la ayuda constante, y al profesor Christian Ihle, por la oportunidad de participar en las distintas actividades asociadas al Programa Tranque. Por último, agradezco al AMTC y a los consultores del proyecto P3 de Estabilidad Física de Depósitos de Relaves, José Campaña y Jorge Troncoso, por los comentarios y recomendaciones durante la realización de este trabajo.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo General.....	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
1.2	Estructura del Trabajo	3
2	Contexto	4
2.1	Tipos de Depósitos de Relave	6
2.2	Tipos de Depositación.....	8
2.3	Clasificación de Depósitos de Relave en Chile	9
2.3.1	Clasificación según Tipo de Depósito.....	9
2.3.2	Clasificación según Estado de Depósito.....	10
2.3.3	Clasificación según Altura y Revancha de Depósito.....	12
2.3.4	Clasificación según Volumen de Depósito.....	14
3	Revisión Bibliográfica.....	16
3.1	Marco Normativo y Buenas Prácticas en Chile	16
3.1.1	Decreto Supremo 248.....	16
3.1.2	Ley 20.551	19
3.1.3	Decreto 41	20
3.1.4	Decreto 50	21
3.1.5	Manual de Evaluación de Riesgo de Faenas Mineras Abandonadas o Paralizadas	24
3.1.6	Evaluaciones de Impacto Ambiental y Resoluciones de Aprobación.	29
3.1.7	Guías de Buenas Prácticas	31
3.2	Estudios Asociados a Estabilidad Física	32
3.2.1	Desarrollo de Herramientas de Evaluación y Criterios Técnicos para asegurar la Estabilidad Física de Instalaciones Remanentes.....	32
3.2.2	Diagnóstico de la Situación Actual de Tranques de Relaves de la V Región	37
3.2.3	Análisis de Árboles de Falla de Depósitos de Relaves Convencional y Espesados.....	40

3.2.4	Evaluación de Falla de Presas de Relaves con el Método del Árbol de Fallas	51
3.3	Análisis de Estudios	52
4	Análisis de Mecanismos de Falla.....	54
4.1	Inestabilidad de Taludes	54
4.1.1	Parámetros Críticos e Instrumentación.....	55
4.1.2	Eventos Gatilladores.....	55
4.2	Erosión Interna.....	56
4.2.1	Parámetros Críticos e Instrumentación.....	59
4.2.2	Eventos Gatilladores.....	59
4.3	Rebalse	60
4.3.1	Parámetros Críticos e Instrumentación.....	60
4.3.2	Eventos Gatilladores.....	61
4.4	Análisis de Fallas por Estabilidad Física	61
4.4.1	Mount Polley, Canadá	64
5	Metodología de Evaluación de Estabilidad Física.....	68
5.1	Evaluación Cualitativa	69
5.1.1	Evaluación del Potencial.....	70
5.1.2	Factores Agravantes.....	73
5.1.3	Evaluación Cualitativa	74
5.2	Análisis de Parámetros Críticos	75
5.3	Desarrollo de Índice de Estabilidad Física	81
5.3.1	Inestabilidad de Taludes.....	81
5.3.2	Erosión Interna	88
5.3.3	Rebalse	92
5.4	Asignación de Probabilidades	96
5.5	Evaluación de Árboles de Falla.....	98
5.6	Sensibilidad de Árboles de Falla	100
6	Análisis y Discusión	106
7	Conclusiones	109
8	Recomendaciones	111

9	Bibliografía.....	112
10	Anexos	115
10.1	Normativa nacional, internacional y buenas prácticas.	115
10.2	Clasificación de estabilidad (Etapa 2, Proyecto INNOVA 15BP-45433)	119

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Resumen de característica por tipo de relave	7
Tabla 2.2. Cantidad de depósitos según tipo (SERNAGEOMIN, 2016).	9
Tabla 2.3. Cantidad de depósitos por región (SERNAGEOMIN, 2016).....	9
Tabla 2.4. Tonelaje de relaves por región (SERNAGEOMIN, 2016).	10
Tabla 2.5. Estado de depósitos por región (SERNAGEOMIN, 2016).....	10
Tabla 2.6. Depósitos con y sin fecha de resolución de Plan de Cierre por región (SERNAGEOMIN, 2016).	11
Tabla 2.7. Distribución a nivel regional de tranques de relave según estado (SERNAGEOMIN, 2016).	12
Tabla 2.8. Distribución a nivel regional de tranques cerrados con y sin fecha de resolución (SERNAGEOMIN, 2016).....	12
Tabla 2.9. Depósitos chilenos con mayor capacidad aprobada (Falcón & Urbano, 2016)	14
Tabla 3.1. Estudios Sismológicos según fase.	17
Tabla 3.2. Clasificación de embalses según Decreto 50.....	22
Tabla 3.3: Periodos de retorno para diseño.	23
Tabla 3.4: Criterios de estudios sismológicos.	24
Tabla 3.5. Criterios para definir la Severidad de las Consecuencias (Golder Associates, 2008)	26
Tabla 3.6. Matriz de riesgo (Golder Associates, 2008).....	27
Tabla 3.7. Combinaciones de Probabilidad de Ocurrencia y Severidad de las Consecuencias (Golder Associates, 2008)	27
Tabla 3.8. Instrumentos de monitoreo en depósitos de relave (Fuente: SEA)	30
Tabla 3.9. Tabla de clasificación de potencial de inseguridad (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2017)	33
Tabla 3.10. Grado de Inseguridad (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2017)	34
Tabla 3.11. Potencial de Ocurrencia de Falla (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2017)	35
Tabla 3.12. Matriz de selección de categoría de métodos de análisis (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2017)	36
Tabla 3.13. Métodos de análisis según categoría y mecanismo de falla (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2017)	36
Tabla 3.14. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para Inestabilidad Estática de Taludes (Taguchi, 2014).....	44
Tabla 3.15. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para Inestabilidad Sísmica de Taludes (Taguchi, 2014).....	45
Tabla 3.16. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para Erosión Interna (Taguchi, 2014)	45

Tabla 3.17. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para Rebalse (Taguchi, 2014)	46
Tabla 3.18. Probabilidad inicial de cada mecanismo de falla (Taguchi, 2014).	46
Tabla 4.1. Instrumentos utilizados para controlar los parámetros críticos.	55
Tabla 4.2. Ensayos utilizados para controlar parámetros críticos	55
Tabla 4.3. Influencia del material en el desarrollo de fallas por erosión interna (Fuente: Fell et al., 2003)	58
Tabla 4.4. Instrumentos utilizados para controlar los parámetros críticos del Rebalse.	61
Tabla 4.5. Clasificación de Fallas tipo 1 y 2, según su nivel de información.	62
Tabla 5.1. Evaluación de condiciones relacionadas con actividades humanas (AH).	71
Tabla 5.2. Evaluación de condiciones relacionadas con recursos naturales.....	71
Tabla 5.3. Evaluación de condiciones relacionadas con infraestructura (I).	71
Tabla 5.4. Evaluación de condiciones relacionadas con las características del depósito.....	73
Tabla 5.5. Potencial de Riesgo.....	73
Tabla 5.6. Evaluación de condiciones relacionadas con desviación respecto al diseño.....	74
Tabla 5.7. Evaluación de eventos gatilladores.	74
Tabla 5.8. Parámetros críticos considerados en el análisis.....	76
Tabla 5.9. Descripción de Causas Raíces para Inestabilidad de Taludes- falla de fundación.....	82
Tabla 5.10. Descripción de Causas Raíces para Inestabilidad de Taludes – falla de talud.	84
Tabla 5.11. Descripción de Causas Raíces para Erosión Interna	89
Tabla 5.12. Descripción de Causas Raíces para Rebalse.	93
Tabla 5.13. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para inestabilidad estática de taludes.....	96
Tabla 5.14. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para inestabilidad sísmica de taludes.....	96
Tabla 5.15. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para Erosión Interna....	97
Tabla 5.16. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para Rebalse.....	97
Tabla 10.1. Leyes, reglamentos y normas nacionales e internacional	115
Tabla 10.2. Guías y Buenas Prácticas Nacionales e Internacional.	117
Tabla 10.3. Puntuación según geometría del depósito (PUCV, 2017)	119
Tabla 10.4. Calificación según tipo de depósito y método constructivo	119
Tabla 10.5. Calificación según nivel de compactación (PUCV, 2017)	119
Tabla 10.6. Calificación según calidad de las arenas (PUCV, 2017)	120
Tabla 10.7. Calificación según grado de implementación de obras y acciones (PUCV, 2017)	120

Tabla 10.8. Calificación según nivel piezométrico (PUCV, 2017).....	120
Tabla 10.9. Calificación según caracterización del suelo de fundación (PUCV, 2017)	120

Índice de Figuras

Figura 2.1. Esquema general de un depósito de relaves.	5
Figura 2.2. Esquema de Tranque de Relaves Convencional.	6
Figura 2.3. Métodos de construcción de tranques de relaves: a) Método de Aguas Arriba, b) Método de Eje Central, c) Método de Aguas Abajo (Mine Safety and Health Administration MSHA, 2010)	8
Figura 2.4. Distribución según rango de altura.....	13
Figura 2.5. Distribución según longitud de la revancha.....	13
Figura 2.6. Vista en Planta de los principales depósitos de relaves en Chile, comparados con el Cerro San Cristóbal (Chile)	15
Figura 3.1. Esquema de evaluación planteado por PUCV	33
Figura 3.2. Metodología de trabajo (Modificado de Carvajal y Pacheco, 2004)	38
Figura 3.3. Resultados del Diagnóstico de Estabilidad (Carvajal & Pacheco, 2004)	40
Figura 3.4. Árbol de Falla General (Modificado de Taguchi, 2014)	41
Figura 3.5. Árbol de Falla para determinar la probabilidad de liberación de relaves (modificado de Taguchi, 2014)	42
Figura 3.6. Árbol de Falla para Inestabilidad Estática de Taludes (modificado de Taguchi, 2014)	42
Figura 3.7. Árbol de Falla para Inestabilidad Sísmica de Taludes (modificada Taguchi, 2014)	43
Figura 3.8. Árbol de Falla para Erosión Interna (modificada de Taguchi, 2014)....	43
Figura 3.9. Árbol de Falla para Rebalse (modificada de Taguchi, 2014).....	44
Figura 3.10. Variación de Parámetros considerada en Análisis de Sensibilidad para Inestabilidad Estática de Taludes.....	47
Figura 3.11. Probabilidad de ocurrencia de cada causa raíz, inestabilidad estática de taludes.....	47
Figura 3.12. Variación de Parámetros considerada en Análisis de Sensibilidad para Inestabilidad Sísmica de Taludes.....	48
Figura 3.13. Probabilidad de ocurrencia de cada causa raíz, inestabilidad sísmica de taludes.....	48
Figura 3.14. Variación de Parámetros considerada en Análisis de Sensibilidad para Erosión Interna.	49
Figura 3.15. Probabilidad de ocurrencia de cada causa raíz, erosión interna.	49
Figura 3.16. Variación de Parámetros considerada en Análisis de Sensibilidad para Rebalse.	50
Figura 3.17. Probabilidad de ocurrencia de cada causa raíz, rebalse.....	50
Figura 3.18. Árbol de Falla de Depósitos de Relave (de la Cruz, 2017).....	52
Figura 4.1. Esquema de Falla Plana – Inestabilidad de Taludes.....	54
Figura 4.2. Esquema de Erosión Interna.....	56

Figura 4.3. Tipos de erosión interna (modificado de Zhang et al., 2016)	57
Figura 4.4. Esquema general de un Rebalse.	60
Figura 4.5. Esquema general del árbol de falla (Adaptado de Chief Inspector of Mines, 2015).....	66
Figura 4.6. Árbol de Falla de Mount Polley (Adaptado de Chief Inspector of Mines, 2015)	67
Figura 5.1. Esquema para determinar el Índice de Estabilidad Física.....	68
Figura 5.2. Esquema general de la evaluación de cada módulo del IEF.....	69
Figura 5.3. Metodología de Evaluación Cualitativa.	70
Figura 5.4. Determinación del Índice de Estabilidad para el caso de Inestabilidad de Taludes.	81
Figura 5.5. Árbol de Falla para la ocurrencia de Inestabilidad de Taludes – Falla de Fundación.....	86
Figura 5.6. Árbol de Falla para la ocurrencia de Inestabilidad de Taludes – Falla de Talud.	87
Figura 5.7. Clasificación de tipos de erosión interna	88
Figura 5.8. Árbol de Falla para la ocurrencia de Erosión Interna.	91
Figura 5.9. Árbol de Falla para la ocurrencia de Rebalse.	95
Figura 5.10. Distribución de Probabilidad de falla por Inestabilidad de Taludes. ..	99
Figura 5.11. Distribución de Probabilidad de falla por Erosión Interna.....	99
Figura 5.12. Distribución de Probabilidad de falla por Rebalse.....	100
Figura 5.13. Sensibilidad de IEF para Inestabilidad de Taludes – Falla de Fundación.	101
Figura 5.14. Sensibilidad de IEF para Inestabilidad de Taludes – Falla de Talud.	101
Figura 5.15. Sensibilidad de IEF para Erosión Interna.....	102
Figura 5.16. Sensibilidad de IEF para Rebalse.	102
Figura 5.17. Sensibilidad de la distribución de probabilidad de inestabilidad de taludes, ante un cambio en: a) formación de grietas en falla de fundación y b) el factor de seguridad estático.	103
Figura 5.18. Sensibilidad de la distribución de probabilidad de erosión interna, ante un cambio en a) error en monitoreo de presión de poros y b) error en monitoreo de filtraciones	104
Figura 5.19. Sensibilidad de la distribución de probabilidad de rebalse, ante un cambio en a) erosión del coronamiento y b) laguna cerca del muro.	105

1 Introducción

Chile basa su crecimiento económico en la actividad minera, siendo principalmente la producción de cobre el motor de desarrollo de este país. A lo largo de los años, Chile ha construido una institucionalidad que permite la inversión en minería que, sumado al alto potencial geológico presente en el país (29,2% de las reservas de cobre del mundo), han logrado posicionarlo internacionalmente como un país minero (Cantallopts, 2016). A partir de la minería, se han generado los ingresos necesarios para financiar tanto obras de infraestructura, como programas de desarrollo y beneficio social (Fundación Chile, 2016).

Sumado a lo anterior, el avance tecnológico obliga a aumentar la producción de cobre, dado su importante uso a nivel mundial en construcción (30%), electrónica (30%), industrial (12%), transporte (13%) e infraestructura (15%) (Consejo Minero, 2015).

Debido a esto, la demanda de cobre ha hecho que se eleven considerablemente los niveles de producción del mineral, lo que, sumado a una disminución en las leyes de estos, se traduce en un aumento importante en el volumen de los desechos del proceso productivo (Fundación Chile & CORFO, 2015). De acuerdo con el Programa de Minería Alta Ley, para el año 2035 se proyecta el aumento de la producción a 8,8 millones de toneladas métricas de cobre promedio, monto que representa aproximadamente el 25%. Así, hacia el año 2035, se espera que la generación de relaves aumente de 600 millones de toneladas por año, a 1.100 millones de toneladas por año. De manera gráfica, este aumento se puede entender como sigue: si en la actualidad se deposita una cantidad de relaves equivalente al Cerro Santa Lucía en Santiago en 36 horas, para el año 2035, esta cantidad se producirá sólo en 21 horas (Fundación Chile & CORFO, 2015).

Esto genera la necesidad de, en primer lugar, identificar las falencias que presenta Chile desde un punto de vista normativo, cuya corrección y mejoramiento permitiría el buen desempeño de los depósitos de relave en todas sus etapas (construcción, operación y cierre). Para esto, se hace necesario además revisar la información disponible relacionada con fallas históricas de estas obras, lo que permite identificar factores de relevancia presentes en estos eventos, dando indicios de en qué es importante hacer hincapié para asegurar la estabilidad de estas estructuras de contención.

Por otro lado, el aumento de la producción de cobre y relave motiva el desarrollo de proyectos de innovación relacionados con la actividad productiva. En la actualidad, existen distintas iniciativas tanto internacionales como nacionales: a nivel internacional, se han desarrollado guías de buenas prácticas en países como Canadá, Australia y Estados Unidos, donde la actividad minera juega un rol importante en la economía. Estas guías son un buen ejemplo a seguir para la normativa chilena.

A nivel nacional, una de las iniciativas es el Programa Nacional de Minería Alta Ley, el cual corresponde a una iniciativa impulsada por CORFO y el Ministerio de Minería, cuyo principal objetivo es fortalecer la productividad, competitividad e innovación en la industria minera, con el fin de impulsar el desarrollo del país. Este programa generó un documento llamado Hoja de Ruta Tecnológica (2015), con el propósito de identificar los desafíos que enfrentará la producción de cobre hacia el año 2035.

Esta Hoja de Ruta plantea núcleos de trabajo, siendo uno de ellos el Núcleo Relaves, el cual se funda en la importancia que toman los depósitos de estos residuos a medida que pasa el tiempo. Como desafío de este núcleo nace otra iniciativa, correspondiente al Programa Tranque, el cual busca aumentar la confianza de las comunidades y autoridades por medio del monitoreo de las variables relevantes de la operación de depósitos de relaves. Entre sus desafíos, este proyecto presenta el de disposición y manejo apropiado de relaves, minimizando los potenciales impactos que éstos puedan tener, asegurando la continuidad operativa y la viabilidad de la industria minera. El principal objetivo de este proyecto es generar tecnologías que permitan la disposición segura de estos desechos.

En función de las iniciativas antes mencionadas, nace la idea de generar metodologías que permitan estudiar el estado de los depósitos de relave, desde la perspectiva de su estabilidad física, con el fin de verificar su correcto funcionamiento. Estas metodologías dependerán del efecto combinado de diferentes factores asociados tanto al depósito en sí (tipo de depósito, estado, entre otros), como a los posibles eventos que puedan gatillar la falla de este. En esta oportunidad, se propone una metodología de tres partes, cada una más compleja que la anterior, mediante la cual se busca determinar la condición de estabilidad de un depósito de relaves, reflejado a través de un índice, el cual puede ser bajo, medio o alto.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

El principal objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología que permita analizar y cuantificar la condición de estabilidad física de depósitos de relaves.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Clasificar los depósitos de relave en Chile, según tipo, estado, altura, volumen embalsado y ubicación.
- Revisión de estudios relacionados con análisis de estabilidad física de depósitos de relaves, incluyendo normativa nacional, internacional y guías de buenas prácticas.
- Revisión de mecanismos de falla que afectan a depósitos de relaves.
- Estudiar fallas mejor documentadas de depósitos de relave, de acuerdo con su nivel de información y clasificación.
- Proponer una metodología de análisis de la condición de estabilidad física para cada mecanismo de falla.
- Analizar la sensibilidad del último módulo de la metodología, ante cambios en sus variables.

1.2 Estructura del Trabajo

El presente documento se estructura en 8 principales capítulos, además de la Introducción y los Anexos. El Capítulo 2 muestra el contexto en el que se encuentran hoy los depósitos de relaves, dando énfasis en el estado de los depósitos chilenos. El Capítulo 3 corresponde a una revisión bibliográfica de los principales documentos normativos que rigen desde el diseño hasta el cierre de los depósitos de relaves en Chile. Además, se incluye la revisión de estudios relacionados con la estabilidad de estas estructuras. Estos capítulos representan la base sobre la cual se definió la metodología planteada en este trabajo.

En el Capítulo 4 se describen los mecanismos de falla considerados en el desarrollo de este trabajo, para luego, en el Capítulo 5, explicar la metodología propuesta para analizar la estabilidad física de los depósitos de relaves. Además, se incluye un análisis de sensibilidad del último módulo de la metodología. Finalmente, el Capítulo 6 corresponde a un análisis de la propuesta metodológica, para luego concluir y entregar recomendaciones a trabajos futuro en los Capítulos 7 y 8, respectivamente.

2 Contexto

El relave corresponde al material con bajo contenido de minerales que no tienen interés económico, que se genera y desecha en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina (Decreto Supremo 248, 2007). Corresponde a una suspensión de sólidos en líquidos, que forma una pulpa.

Para su almacenamiento, se deben diseñar y construir los llamados Depósito de Relaves, que se definen por el Decreto Supremo 248 (2007) como toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una planta de concentración húmeda de especies de minerales. Su función principal es la de servir como depósito, generalmente, definitivo de los materiales sólidos proveniente del relave transportado desde la planta, permitiendo así la recuperación, en gran medida, del agua que transporta dichos sólidos (Decreto Supremo 248, 2007)

Para lo anterior, se debe llevar a cabo un Proyecto de Depósito de Relaves, el cual corresponde al conjunto de estudios técnicos requeridos para la definición de un sistema de disposición de relaves, incluyendo etapas de investigación, prospección, diseño, evaluación, construcción y operación. Estos estudios deben presentarse en documentos claros, de manera tal que se permita su cabal comprensión de la ingeniería que conllevan, incluyendo sus procedimientos de operación y los métodos y obras consideradas para garantizar la estabilidad física y química del depósito y su entorno, con el fin de proteger a las personas, bienes y medio ambiente (Decreto Supremo 248, 2007).

En términos generales, un depósito de relaves cuenta con los componentes que se mencionan a continuación y que se muestran en la Figura 2.1.

Muro: Estructura que permite contener los residuos sólidos que se descargan (SERNAGEOMIN, 2015). También llamado Prisma Resistente, corresponde a la zona periférica del depósito de relaves, estructurada artificialmente y complementa el perímetro natural para conformar la zona de la cubeta (Decreto Supremo 248, 2007).

Cubeta: Volumen físico, delimitado por el muro, disponible para el depósito de relaves, junto con gran parte del agua de este material (SERNAGEOMIN, 2015). Es la zona del depósito de relaves en la cual se acumularán los sólidos de grano más finos de los relaves, en el caso de los Tranques de Relaves, o la totalidad de los relaves, en los otros sistemas de depositación (Decreto Supremo 248, 2007).

Laguna de Aguas Claras: Es parte de la cubeta de un depósito, y se forma en tanto los sólidos sedimentan a las capas inferiores (SERNAGEOMIN, 2015). Corresponde a aguas libres de partículas en suspensión, que se ubican en un sector de la cubeta de los embalses y tranques de relaves, una vez que decantan los sólidos finos de la pulpa de relaves (Decreto Supremo 248, 2007).

Sistema de Drenaje: Sistema utilizado para retirar al grado adecuado el agua del interior del muro, con el objetivo de deprimir al máximo el nivel freático en el interior del cuerpo del muro (SERNAGEOMIN, 2015).

Revancha: Diferencia menor, en cota, entre la línea de coronamiento del muro de contención y la superficie inmediatamente vecina de la fracción lamosa o de la superficie del agua, que se produce en los tranques y embalses de relaves (Decreto Supremo 248, 2007).

Coronamiento: Parte superior del muro de contención o prisma resistente (Decreto Supremo 248, 2007).

Canal de Contorno: Canal de desvío de las aguas de la cuenca que captan y desvían las escorrentías superficiales, impidiendo el ingreso a la cubeta del depósito de relaves. (SERNAGEOMIN, 2015)

Playa Activa: Zona donde se descargan los relaves en la cubeta. Se le denomina Playa porque usualmente está seca en la superficie y se asemeja a una playa de arenas finas. Es la parte del depósito situada en las cercanías de la línea de vaciado. (SERNAGEOMIN, 2015)

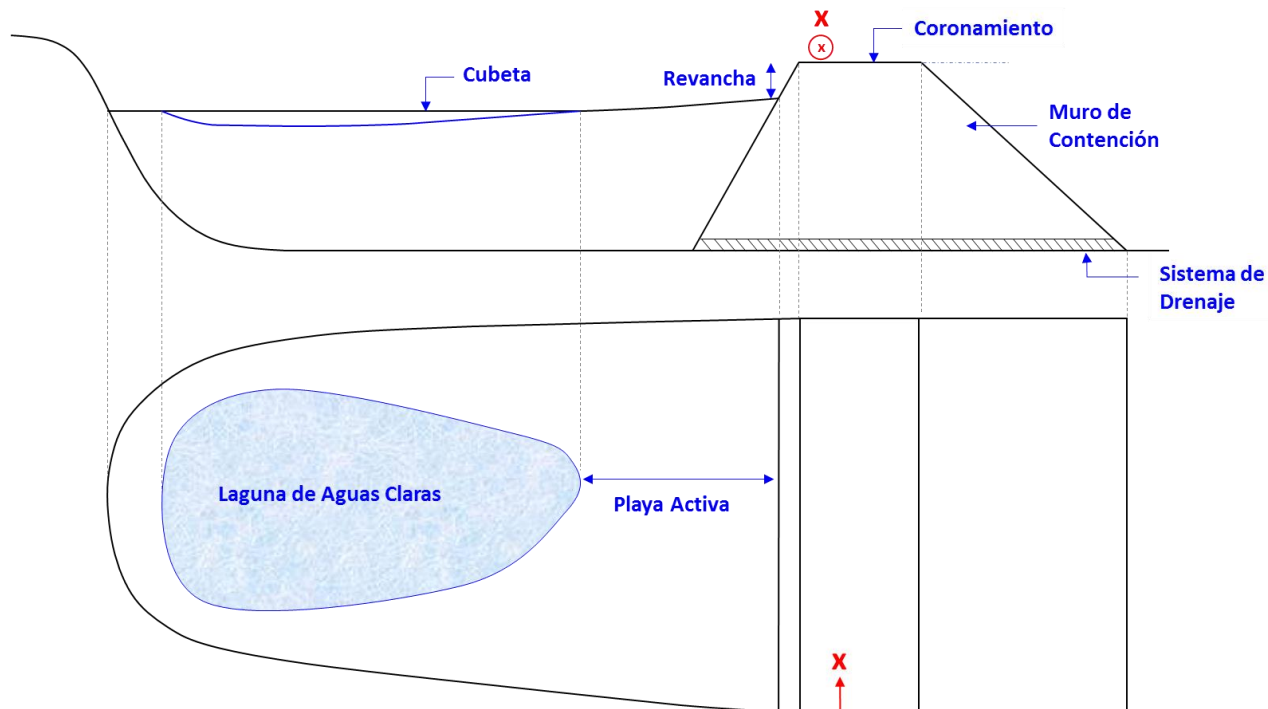


Figura 2.1. Esquema general de un depósito de relaves.

2.1 Tipos de Depósitos de Relave

Las características y el comportamiento del relave dependen, entre otras, de su porcentaje de sólidos, que corresponde a la relación entre el peso seco del relave y el peso total de la pulpa (relave más agua). Este valor define la clasificación de los tipos de relave y su forma de almacenamiento.

Así, el Decreto Supremo 248 (2007) asigna la siguiente clasificación:

Tranque de Relave: Depósito donde el muro de contención es construido con la fracción más gruesa del relave, correspondiente a las arenas. Para la construcción y operación de este depósito, se considera la separación del relave a través de hidrociclones, los cuales separan la parte gruesa del relave, de la fina. Así, la parte gruesa, o arenas, se utilizan para la construcción del muro de contención, mientras que la parte fina, también llamada lamas, se almacena en el depósito. Este proceso se muestra esquemáticamente en la Figura 2.2.

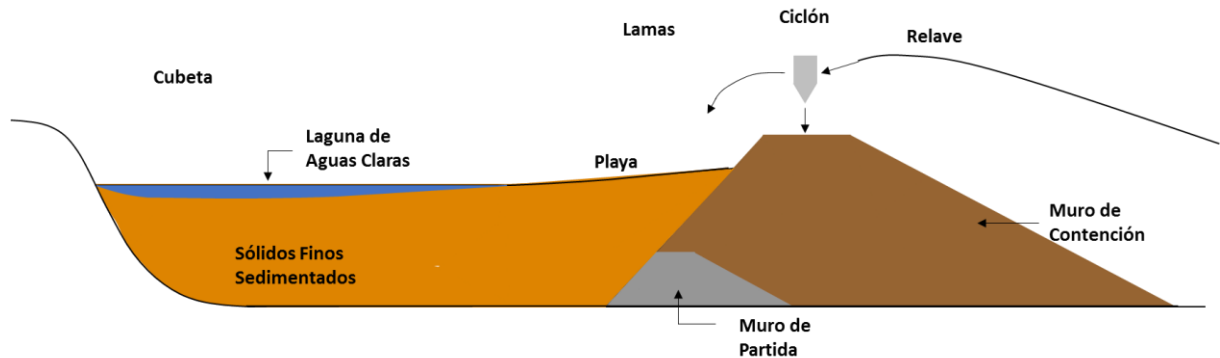


Figura 2.2. Esquema de Tranque de Relaves Convencional.

Embalse de Relave: Es aquel depósito de relaves donde el muro de contención está construido con material de empréstito y se encuentra impermeabilizado en el coronamiento y en su talud interno. La impermeabilización puede estar realizada con un material natural de baja permeabilidad o de material sintético como geomembrana de alta densidad. También se denominan embalses de relave a aquellos depósitos que se ubican en depresiones del terreno, en las cuales no es necesaria la construcción de un muro de contención.

Relave Espesado: Depósito donde los relaves son sometidos a un proceso de sedimentación, previo a su depositación. Con esto, mediante un espesador, se elimina una parte importante del agua que contienen. Debido a que no requiere de un muro contenedor para su construcción, el depósito de relaves espesado deberá ser construido de tal forma que se impida que el relave fluya a lugares distintos a las del emplazamiento determinado. Además, debe contar con un sistema de piscinas de recuperación del agua remanente.

Relave Filtrado: Es aquel depósito en el que los relaves son sometidos a un proceso de filtración previo a su depositación. Esto se realiza mediante equipos especiales de filtros, los cuales deben asegurar que la humedad del relave se encuentre entre 20% y 30%.

Este relave es transportado mediante maquinaria y/o correas transportadoras, desde la planta de filtro hasta el sitio de disposición final.

Relave en Pasta: Situación intermedia entre relave espesado y filtrado. Corresponde a una mezcla homogénea de relaves sólidos y agua (entre 10 y 25% de agua) que contiene partículas finas en una concentración en peso cercana al 15%, producto de un proceso de sedimentación al que se someten. Su depositación se efectúa sin necesidad de compactación.

La Tabla 2.1 muestra el porcentaje de sólidos para los relaves espesados, filtrados y en pasta, cada uno con un ejemplo de aplicación.

Tabla 2.1. Resumen de característica por tipo de relave

Tipo de Relave	Concentración en Peso de los Sólidos	Ejemplo
Relave Convencional	Entre 30% y 50%	Talabre – CODELCO, división Chuquicamata Cp = 48%
Relave Espesado	Entre 50% y 65%	El Sauce – Minera Las Cenizas Cp = 63%
Relave en Pasta	Entre 65% y 75%	Depósito de Relaves en Pasta Sector 5 - COEMIN Cp = 73,5%
Relave Filtrado	Cercano al 80%	La Coipa – Compañía Minera Mantos de Oro Cp = 80%

Con respecto a los estados en los que se puede encontrar un depósito, se consideran los tres siguientes:

Activo: Depósito de relaves con dueño conocido y en operación.

No Activo: Depósito de relaves con dueño conocido, pero fuera de operación. En este caso, el dueño del depósito continúa con el control y monitoreo del depósito.

Abandonado: Depósito de relaves que no tiene dueño conocido ni resolución de origen. Dentro de esta categoría también entran aquellos depósitos a los cuales se les verifica su condición de abandonado, o si tienen información oficial o fidedigna que indique que no se efectuó ninguna medida de cierre.

2.2 Tipos de Depositación

Por tipo de depositación, se hace referencia al método utilizado para el crecimiento del tranques de relave. Existen tres métodos, los cuales muestran en la Figura 2.3 y se mencionan a continuación:

Método de Aguas Arriba: Se construye un muro de partida, desde el cual se inicia la depositación de las arenas de relave en dirección aguas arriba, quedando apoyadas sobre la cubeta del tranque. Así, cada nueva plaza se convierte en la fundación de la etapa siguiente. Este método se observa en la Figura 2.3 a). En Chile se tiene prohibida su construcción desde el año 1970.

Método de Eje Central: También llamado Método Mixto. En él, el crecimiento del muro de partida se hace siguiendo el plano vertical. Así, se construye el muro de la nueva etapa tanto sobre la playa como sobre el muro generados en la etapa anterior. Un esquema de este método se muestra en la Figura 2.3 b).

Método de Aguas Abajo: Método más utilizado en Chile, consiste en el crecimiento del muro en dirección de aguas debajo de su muro de partida. Así, cada etapa se deposita sobre el muro de la etapa anterior, y no sobre la playa. La Figura 2.3 c) muestra un esquema de este método de construcción.

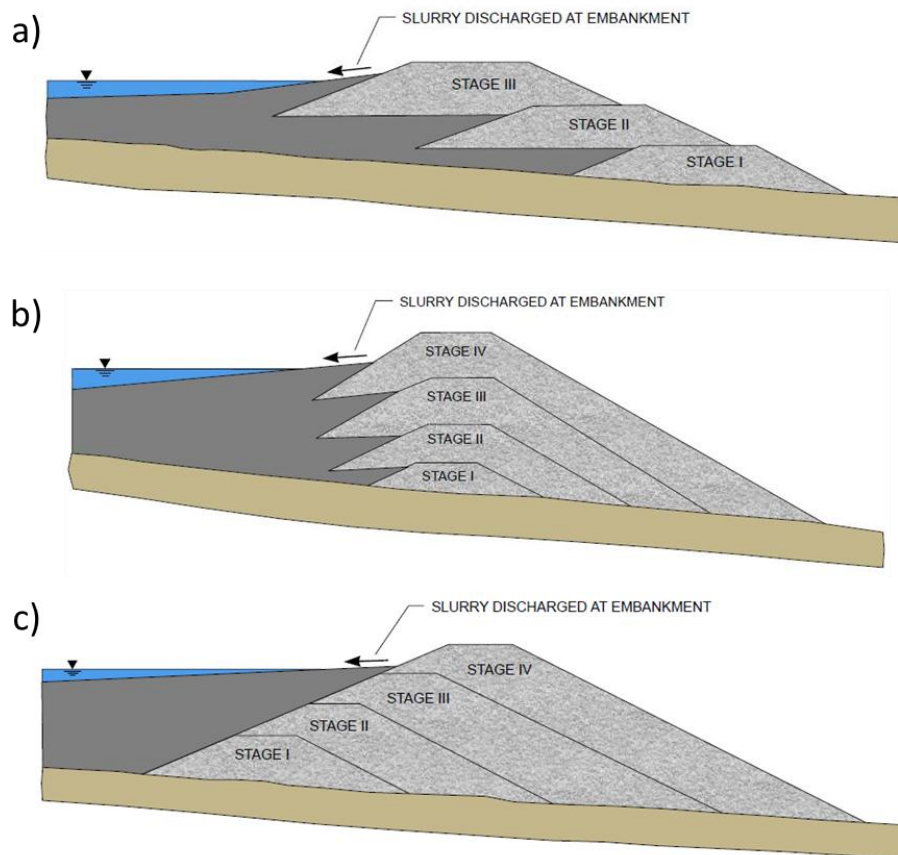


Figura 2.3. Métodos de construcción de tranques de relave: a) Método de Aguas Arriba, b) Método de Eje Central, c) Método de Aguas Abajo (Mine Safety and Health Administration MSHA, 2010)

2.3 Clasificación de Depósitos de Relave en Chile

El Departamento de Depósitos de Relaves del Servicio Nacional de Geología y Minería, entre sus labores tiene la de recopilar información asociada a los depósitos de relave, mediante la realización de un catastro anual. Esta información se encuentra a libre disposición a través de la página web del SERNAGEOMIN.

De acuerdo con la última versión de este catastro (año 2016), se tiene un registro de 696 depósitos de relaves, los cuales pueden ser clasificados en diferentes categorías:

2.3.1 Clasificación según Tipo de Depósito

La cantidad y porcentaje de cada tipo de depósito se muestra en la Tabla 2.2, donde es posible observar que el tipo predominante en el país es de tranques de relaves.

Tabla 2.2. Cantidad de depósitos según tipo (SERNAGEOMIN, 2016).

Tipo	Cantidad	Porcentaje
Embalse	105	15%
Tranque	567	81%
Filtrado	7	1%
En Pasta	4	1%
Espesado	4	1%
Otros	9	1%
Total	696	100%

Si se analiza la distribución de depósitos a nivel regional, se puede observar que, en todas las regiones del país, a excepción de la VII, predomina la existencia de tranques de relaves. La Tabla 2.3 muestra el detalle de cada región.

Tabla 2.3. Cantidad de depósitos por región (SERNAGEOMIN, 2016).

Región	Otros	Espesado	En Pasta	Filtrados	Tranque	Embalse	Total	Porcentaje
I	0	0	0	0	6	1	7	1,0 %
II	0	4	0	3	27	9	43	6,2 %
III	1	0	1	2	124	27	155	22,3 %
IV	8	0	1	1	324	34	368	52,8 %
RM	0	0	1	0	19	4	24	3,5 %
V	0	0	1	0	53	19	73	10,5 %
VI	0	0	0	0	9	9	18	2,6 %
VII	0	0	0	0	1	2	3	0,4 %
XI	0	0	0	1	4	0	5	0,7 %
Total	9	4	4	7	567	105	696	100 %

En términos de toneladas, es posible conocer la distribución nacional de estos, en base a la información del catastro del SERNAGEOMIN (2016). Los toneladas mostrados en la Tabla 2.4 corresponden a los autorizados para cada depósito, donde se observa que el mayor porcentaje de relave se encuentra en la región Metropolitana, seguido por la cuarta región.

Tabla 2.4. Tonelaje de relaves por región (SERNAGEOMIN, 2016).

Región	Otros [MTon]	Espesado [MTon]	En Pasta [MTon]	Filtrados [MTon]	Tranque [MTon]	Embalse [MTon]	Total [MTon]	Porcentaje
I	0	0	0	0	0,006	1040	1040,0	4,5 %
II	0	2127,8	0	202,8	2637,6	4504,7	9472,8	40,8 %
III	2,53	0	100	130,8	1305,2	798,5	2337,0	10,0 %
IV	0,15	0	10	0,72	501,9	2183,5	2696,3	11,6 %
RM	0	0	17,4	0	3126,6	3288,3	6432,2	27,7 %
V	0	0	8,8	0	363,2	218,8	590,8	2,5 %
VI	0	0	0	0	440,8	214,2	655,0	2,8 %
VII	0	0	0	0	0,3	0,8	1,1	0,0 %
XI	0	0	0	3,3	14,3	0	17,5	0,1 %
Total	2,7	2127,8	136,2	337,6	8389,8	12248,9	23242,9	100 %

2.3.2 Clasificación según Estado de Depósito

Respecto al estado de los depósitos, la Tabla 2.5 presenta la distribución a lo largo de país, según si el depósito se encuentra abandonado, no activo, o activo.

Tabla 2.5. Estado de depósitos por región (SERNAGEOMIN, 2016).

Región	Abandonados	No Activos	Activos	Total	Porcentaje
I	6	0	1	7	1,0 %
II	11	20	12	43	6,2 %
III	22	105	28	155	22,3 %
IV	97	232	39	368	52,8 %
RM	4	14	6	24	3,5 %
V	8	47	18	73	10,5 %
VI	0	14	4	18	2,6 %
VII	0	1	2	3	0,4 %
XI	0	3	2	5	0,7 %
Total	148	436	112	696	100 %
Porcentaje	21,26 %	62,64 %	16,09 %	100%	

Dentro de los 436 depósitos no activos, se puede hacer la separación entre aquellos que presentan fecha de resolución del Plan de Cierre, de aquellos que no. De acuerdo con el SERNAGEOMIN, la fecha de resolución del Plan de Cierre corresponde a la fecha en la cual se aprobó el Plan de Cierre. Esto asegura que el depósito de relave cumple con lo pedido cuando se lleva a cabo la etapa de cierre. La situación en Chile indica que hay 332 depósitos no activos que no presentan fecha de resolución, equivalente al 76%, mientras que sólo 104 depósitos (24%) sí tienen fecha de resolución de Plan de Cierre. La muestra la distribución de estos depósitos a nivel regional, donde se observa una mayor cantidad de depósitos sin fecha de resolución de aprobación en la IV región. Además, se puede observar que se repite la tendencia a nivel regional, donde hay mayor cantidad de depósitos no activos sin fecha de resolución de Plan de Cierre que de depósitos con fecha de resolución.

Tabla 2.6. Depósitos con y sin fecha de resolución de Plan de Cierre por región (SERNAGEOMIN, 2016).

Región	Con Fecha de Resolución	Sin Fecha de Resolución	Total	Porcentaje
I	0	0	0	0,0 %
II	9	11	20	4,5 %
III	25	80	105	24,1 %
IV	32	200	232	53,2 %
RM	11	3	14	3,2 %
V	16	31	47	10,8 %
VI	8	6	14	3,2 %
VII	0	1	1	0,3 %
XI	3	0	3	0,7 %
Total	104	332	436	100 %
Porcentajes	24 %	76 %	100 %	

El análisis según estado de depósitos puede realizarse de forma análoga para los tranques de relaves, dado que son el tipo de depósito predominante en Chile (567 de 696). Así, se muestra en la Tabla 2.7 la distribución a nivel regional según el estado en el que se encuentran, donde se observa que predominan los tranques en estado no activo. De estos, se tienen 284 tranques de relaves no activos que no tienen fecha de resolución, los cuales corresponden al 76% de tranques del país. La distribución regional de estos tranques se presenta en la Tabla 2.8.

Tabla 2.7. Distribución a nivel regional de tranques de relave según estado (SERNAGEOMIN, 2016).

Región	Abandonados	No Activos	Activos	Total	Porcentaje
I	6	0	0	6	1,1 %
II	10	14	3	27	4,8 %
III	22	86	16	124	21,9 %
IV	86	215	23	324	57,1 %
RM	4	12	3	19	3,4 %
V	8	37	8	53	9,3 %
VI	0	8	1	9	1,6 %
VII	0	1	0	1	0,2 %
XI	0	3	1	4	0,7 %
Total	136	376	55	567	100 %
Porcentaje	24%	66,3%	9,7%	100%	

Tabla 2.8. Distribución a nivel regional de tranques cerrados con y sin fecha de resolución (SERNAGEOMIN, 2016).

Región	Con Fecha de Resolución	Sin Fecha de Resolución	Total	Porcentaje
I	0	0	0	0,0 %
II	6	8	14	3,7 %
III	22	64	86	22,9 %
IV	28	187	215	57,2 %
RM	10	2	12	3,2 %
V	16	21	37	9,8 %
VI	7	1	8	2,1 %
VII	0	1	1	0,3 %
XI	3	0	3	0,8 %
Total	92	284	376	100 %
Porcentaje	24,47 %	75,53 %		

2.3.3 Clasificación según Altura y Revancha de Depósito

Los depósitos de relave en Chile, independiente del estado en el que se encuentren, deben entregar un informe trimestral con información que solicita el SERNAGEOMIN mediante su formulario E700. En base a formularios facilitados por esta institución, correspondiente a 68 depósitos, es posible saber en qué rangos de altura se encuentran los depósitos de relaves chilenos. Además, se pueden conocer los rangos de valores en los cuales se mueve el tamaño de la revancha. Esto se observa en Figura 2.4 y Figura 2.5, respectivamente.

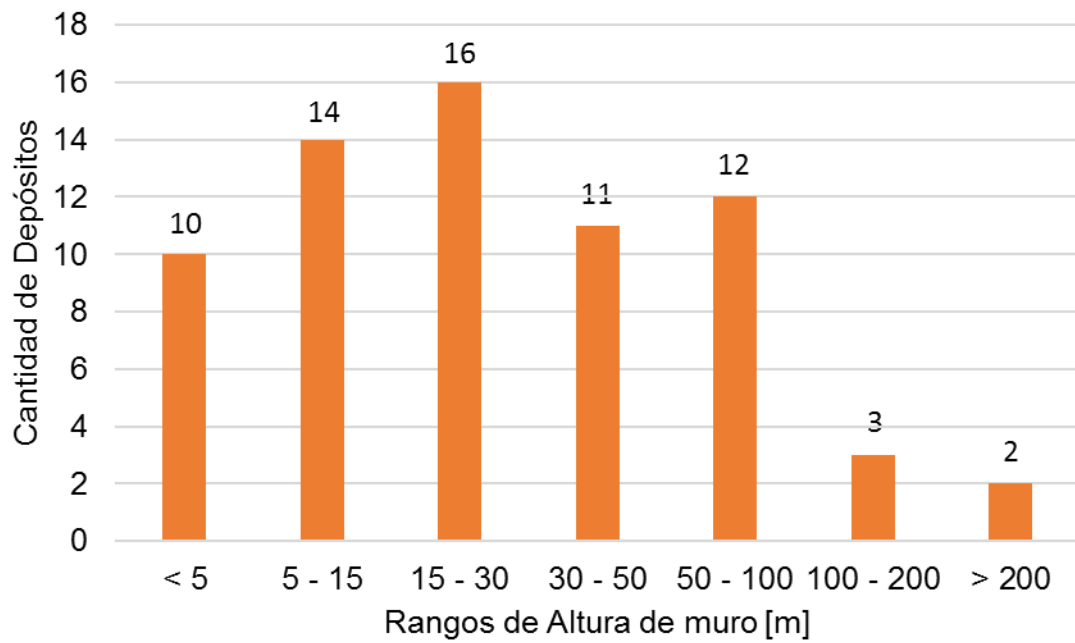


Figura 2.4. Distribución según rango de altura

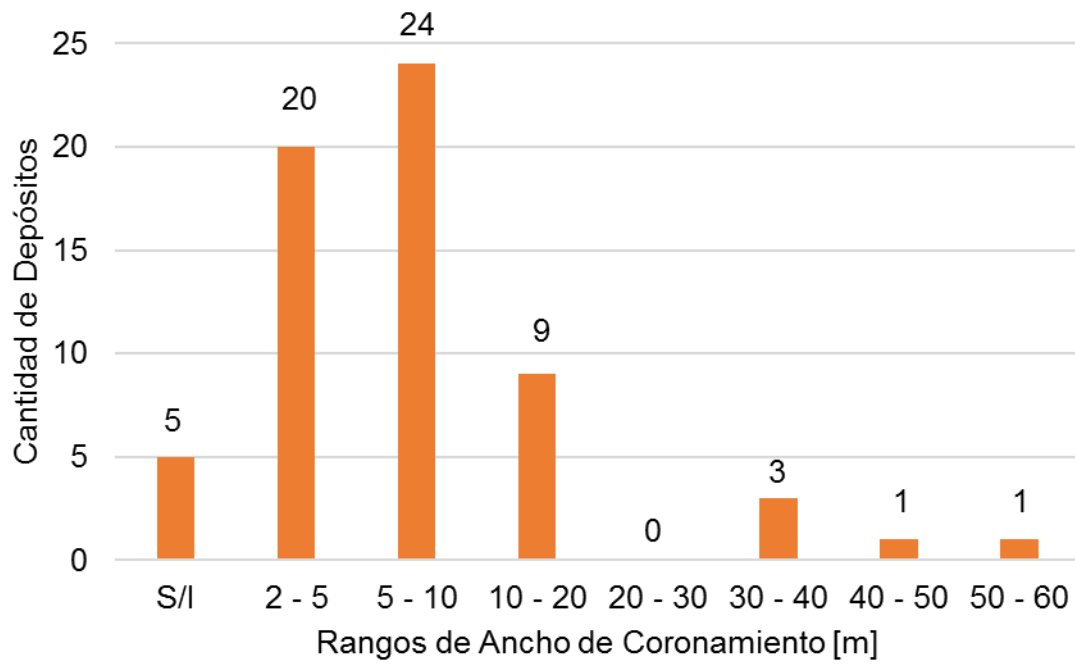


Figura 2.5. Distribución según longitud de la revancha.

2.3.4 Clasificación según Volumen de Depósito

Nuevamente, en base al Catastro realizado por el SERNAGEOMIN, es posible hacer un análisis respecto al volumen de los depósitos. Para esto, es importante diferenciar entre el volumen autorizado y el volumen actual del depósito de relaves:

Volumen autorizado: Corresponde al volumen máximo capaz de recibir el depósito.

Volumen actual: Corresponde al volumen depositado a la fecha. Esta información se reporta mediante los formularios E-700, o entregada directamente por las empresas.

De acuerdo con Urbano y Falcón (2016), los depósitos con mayor capacidad aprobada en Chile son los que se muestran en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Depósitos chilenos con mayor capacidad aprobada (Falcón & Urbano, 2016)

Depósito	Faena	Empresa	Región	Provincia	Comuna	Cap. aprobada [Millones ton]	Estado
Laguna Seca	Escondida	Minera Escondida Ltda.	II	Antofagasta	Antofagasta	4.500	Activo
Talabre	Chuquicamata	CODELCO	II	El Loa	Calama	2.104	Activo
Ovejería	Andina	CODELCO	RM	Chacabuco	Tiltil	1.930	Activo
Carén	El Teniente	CODELCO	RM	Melipilla	Alhué	1.840	Activo
El Mauro	Faena Los Pelambres	Minera Los Pelambres	IV	Choapa	Los Vilos	1.700	Activo
Sierra Gorda	Proyecto Sierra Gorda	SCM Sierra Gorda	II	Antofagasta	Sierra Gorda	1.350	Activo
Pampa Pabellón	Collahuasi	Cia. Minera Doña Inés de Collahuasi	I	El Tamarugal	Pica	1.040	Activo
Las Tórtolas	Los Bronces	Anglo American	RM	Chacabuco	Colina	1.000	Activo
Proyecto Esperanza	Proyecto Esperanza	Cia. Minera Centinela	II	Antofagasta	Sierra Gorda	750	Activo
Depósito de Arenas	Caserones	Minera Lumina Copper Chile Ltda.	III	Copiapó	Tierra Amarilla	570	Activo

De manera gráfica, se puede ver la magnitud de estas estructuras en la Figura 2.6, donde se muestra una comparación a escala entre los principales depósitos y el Cerro San Cristóbal en Santiago, Chile.



Figura 2.6. Vista en Planta de los principales depósitos de relaves en Chile, comparados con el Cerro San Cristóbal (Chile)

3 Revisión Bibliográfica

3.1 Marco Normativo y Buenas Prácticas en Chile

Los documentos existentes se pueden separar en aquellos que corresponden a normas y/o leyes, y en los que representan guías de buenas prácticas y/o recomendaciones de evaluación. En la sección de Anexos se muestran algunas de las utilizadas tanto en Chile como en el resto del mundo, con sus respectivas instituciones. A continuación, se entregan los puntos de mayor relevancia de las normas chilenas que son fundamentales en la realización de proyectos de depósitos de relaves.

3.1.1 Decreto Supremo 248

Corresponde a un Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves, publicado el 11 de abril del año 2007. Se desarrolla considerando la necesidad de proteger la salud y la seguridad de las personas, la protección del medio ambiente y la utilización racional de los recursos naturales del país, además de la necesidad de precisar las exigencias técnicas, con el fin de aplicar conceptos más avanzados en la construcción de depósitos de relaves de la minería chilena.

El objetivo de este reglamento es fijar normas, específicamente sobre los procedimientos que se siguen en la aprobación de proyectos de depósitos de relaves mineros, y sobre requisitos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves mineros y la disposición de sus obras anexas, esto con el fin de garantizar la seguridad de las personas y de los bienes.

El Título II de este Decreto Supremo entrega la información necesaria para la aprobación de estos proyectos, por parte del Servicio. El usuario debe presentar una solicitud con algunos antecedentes. Incluyendo los parámetros geotécnicos de diseño, en los que se deben considerar:

- Resistencia al corte
- Compresibilidad
- Permeabilidad
- Granulometrías
- Pesos unitarios
- Pesos específicos
- Plasticidad

Es importante contar además con una descripción de los sistemas de instrumentación y control que serán usados para el monitoreo del comportamiento del depósito. Estos equipos deben medir, como mínimo, las siguientes variables:

- Presiones de poros
- Niveles freáticos
- Desplazamientos
- Asentamientos
- Filtraciones
- Aceleraciones sísmicas

Para las etapas de operación y cierre, es necesario hacer un análisis de estabilidad de taludes. Para esto, se distinguen cuatro fases, según la importancia y la evaluación de los riesgos que se pueden presentar en el depósito. Estas fases se ordenan de forma creciente según su precisión y son las siguientes:

Tabla 3.1. Estudios Sismológicos según fase.

Fase	Estudio Sismológico
I	Simulación de estabilidad estática (análisis pseudo-estático) asumiendo licuefacción total de los relaves de la cubeta
II	Simulación de estabilidad estática (análisis pseudo-estático) con determinación simplificada de las presiones de poros
III	Análisis dinámicos basados en ensayos de propiedades dinámicas de los suelos, incluyendo cálculos de desplazamientos
IV	Análisis para condición de cierre, incluyendo eventos solicitantes máximos y efectos del tiempo en las propiedades de los depósitos

Para las fases I y II, se debe cumplir un factor de seguridad de al menos 1,2. Si el muro del depósito es menor a 15 metros, no es necesario cumplir con la Fase III si se cumple con el factor de seguridad ya mencionado.

Respecto a casos de fallas, se define la distancia peligrosa, la cual corresponde a la distancia, en kilómetros, que recorrería el relave en el caso de colapso del depósito. Con respecto a su determinación, se debe incluir un plano de la hoya hidrográfica afectada por la trayectoria más probable del relave en el caso que el depósito colapse.

Se debe presentar un Manual de Emergencias para el control, mitigación, restauración y compensación de los efectos de accidentes, situaciones de emergencia y eventos naturales. Este manual debe incluir:

- Planos de ubicación del depósito y de las áreas que podrían resultar afectadas en caso de falla. El cálculo del área afectada debe justificarse según el mecanismo de falla y condiciones de transporte de los relaves.

- Planes de acción para ejecutar las medidas inmediatas relacionadas con eliminar o minimizar los riesgos de daños a personas. Estas medidas pueden ser detección de anomalías, alertas, aviso a autoridades pertinentes, evacuación, entre otras.
- Programa de capacitación de personal para la operación segura del depósito y de las obras anexas, y para el manejo adecuado de las situaciones de emergencia.

Es importante agregar que, de acuerdo con el artículo 38 de este Decreto Supremo, si la causa de emergencia corresponde a fenómenos naturales extremos imprevistos que impidan la normal operación del depósito y pongan en peligro la vida de las personas y/o del medio ambiente, deberán suspenderse las operaciones hasta que las condiciones de seguridad del depósito se restablezcan.

En relación con la operación y la mantención de los depósitos de relaves, el usuario debe enviar un informe trimestral, mediante el formulario establecido (E700). Sin embargo, el Servicio tiene la facultad de solicitar cualquier información adicional que sea de utilidad. Además, el Servicio podrá hacer las verificaciones que estime necesarias y sancionar si no se están cumpliendo las normas.

Cuando se suspenden las operaciones del depósito de relaves, es necesario que se adopten las medidas adecuadas para evitar accidentes. Estas medidas deben ser comunicadas previamente al Servicio, pero si el cese de operaciones excede un plazo de 2 años, el usuario deberá presentar un proyecto de Plan de Cierre al Servicio. Por otro lado, si decide volver a operar, se debe entregar una solicitud al Servicio.

Si se entrega un Proyecto de Cierre, éste debe contener un plan de acondicionamiento del depósito a largo plazo, considerando posibles refuerzos y/o medidas de rehabilitación. El fin de este plan es proteger la salud y seguridad de las personas y restituir el terreno en condiciones aceptables.

El Título VI de este Decreto Supremo presenta algunos criterios de control, los cuales se mencionan a continuación:

- La laguna de aguas claras debe mantenerse lo más alejada posible del muro de contención, para evitar la saturación del muro y el consecuente aumento de presiones de poros, lo que puede ayudar al colapso.
- Es recomendable recuperar las aguas claras del depósito de manera constante, ya que los relaves saturados son muy susceptibles a licuación sísmica.
- La revancha de los depósitos de relaves debe ser al menos de 1 metro.
- El coronamiento debe tener un ancho tal que asegure la estabilidad del muro, y no puede ser menor a 2 metros.

- El proyecto que se presente debe incluir, al menos:
 - Descripción de las obras
 - Planos
 - Memorias de cálculo
 - Especificaciones de construcción
 - Planes de control y monitoreo
 - Normas de operación
- Las etapas del proyecto deben ejecutarse en forma secuencial, continua e integrada, permitiendo la evaluación, la realimentación y la optimización de las obras.
- El operador del depósito de relaves debe monitorear y controlar las instalaciones, verificando que se cumpla con las especificaciones y los requerimientos que imponen los Fiscalizadores.
- El muro de contención debe tener un sistema de drenaje en la base.
- El muro de partida debe tener una altura mínima equivalente a un décimo (1/10) de la altura final del muro de contención proyectado, pero no puede ser menor a 2 metros. Este muro debe tener su coronamiento y talud interno con un sistema de impermeabilización.
- En los tranques de relaves, la fracción más gruesa de arena debe contener, como máximo, un 20% de partículas menores a 200 mallas.

3.1.2 Ley 20.551

Corresponde a la ley que controla el cierre las faenas de la industria extractiva minera, el cual se lleva a cabo a través del Plan de Cierre.

Un plan de cierre tiene como objetivo principal la ejecución de medidas y acciones destinadas a mitigar los efectos que se derivan del desarrollo de la industria minera. En particular, busca asegurar la estabilidad física y química de los lugares donde se realiza la actividad. La importancia de esta ley radica en que el cierre de una faena minera debe ser planificado e implementado de forma progresiva durante las etapas de operación de la faena minera.

En el contexto de los depósitos de relave, éstos se consideran como parte de las faenas mineras, por lo que debe aplicarse la ley sobre éstos. En esta ley, la estabilidad física se considera como una situación de seguridad estructural que mejora la resistencia y disminuye las fuerzas que pueden afectar a las faenas mineras. Esta ley considera como medidas estabilizadoras a:

- Estabilización y perfilamiento de taludes
- Reforzamiento o sostenimiento de éstos
- Compactación del depósito
- Otras que permitan mejorar las condiciones o características geotécnicas de las obras o depósitos mineros.

3.1.3 Decreto 41

Como parte del Decreto Supremo 248, cada faena minera debe entregar un informe trimestral en el cual se informa sobre el manejo y control del depósito a lo largo de su operación. Este informe debe incluir información solicitada en un formulario denominado E700. En términos generales, este formulario exige el siguiente contenido mínimo:

- 1) Identificación de la Faena Minera.
 - Nombre de la Empresa.
 - Rut de la Empresa.
 - Dirección.
 - Nombre del Representante Legal.
 - Nombre de la Faena.
 - Ubicación Geográfica.

- 2) Informe Técnico del Depósito de Relaves.
 - Nombre del depósito.
 - Tipo de depósito.
 - Método constructivo del muro del tranque.
 - Cantidad de relaves.
 - Altura del muro.
 - Largo berma de coronamiento.
 - Ancho berma de coronamiento.
 - Distancia borde de laguna-borde muro de arenas.
 - Ancho aproximado sector playa en la cubeta.
 - Revancha operacional mínima.
 - Área ocupada.
 - Ángulo de talud externo e interno del muro.
 - Razón Arenas/Lamas.
 - % de sólido en peso del relave total.
 - % de humedad relave filtrado y/o espesado.
 - Método de compactación del muro.
 - Densidades de las arenas del muro.
 - Granulometría de las arenas del muro.
 - Granulometría del relave total.
 - Piezometría.

3) Información Anexa.

- Detalles de los trabajos de mantenimiento mensual y durante el periodo realizado en el depósito.
- Detalles de los trabajos de operación mensual y durante el periodo realizado en el depósito.
- Información de controles y estadísticas sobre monitoreos especiales realizados en el depósito durante el periodo si se dispone de los equipos.

No es obligación para las empresas mineras entregar datos sobre lo solicitado como Información Anexa.

3.1.4 Decreto 50

Decreto del año 2015, que aprueba el reglamento del artículo 295, inciso 2º, del Código de Aguas, que establece las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las obras hidráulicas identificadas en el artículo 294 del Código de Aguas. Este último artículo hace referencia a las obras que requieren la aprobación del Director General de Aguas para su construcción. Estas obras son:

- a) Los embalses de capacidad superior a cincuenta mil metros cúbicos de material, o cuyo muro tenga más de 5 metros de altura.
- b) Los acueductos que conduzcan más de dos metros cúbicos por segundo.
- c) Los acueductos que conduzcan más de medio metro cúbico por segundo, que se proyecten próximos a zonas urbanas, y cuya distancia al extremo más cercano del límite urbano sea inferior a un kilómetro y la cota de fondo sea superior a 10 metros sobre la cota de dicho límite.
- d) Los sifones y canoas que crucen cauces naturales.

El artículo 295 del Código de Aguas indica que la Dirección General de Aguas debe otorgar la autorización de construcción una vez que se apruebe el proyecto definitivo, siempre que se haya comprobado que la obra no afectará la seguridad de terceros ni producirá la contaminación de las aguas. Para esto, un reglamento especial debe fijar las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de dichas obras. Este reglamento es el que se aprueba en el Decreto 50, cuyo objetivo es otorgar certeza y seguridad jurídica a todas las personas, respecto de los requisitos técnicos exigidos por la Dirección General de Aguas, en el proyecto, construcción y operación de las obras señaladas en el artículo 294 ya mencionado.

Es importante mencionar que los depósitos de relaves en pasta, filtrados y espesados con un 65% o más de concentración en peso de sólidos, quedan exentos de la aplicación de este reglamento.

El Artículo 12 de este decreto entrega la clasificación de los embalses, la que se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Clasificación de embalses según Decreto 50.

Categoría	Clasificación	Características
A	Pequeños	Altura de muro máxima mayor a 5 metros e inferior a 15 metros, o bien de capacidad superior a 50.000 m ³ e inferior a 1.500.000 m ³ .
B	Medianos	Altura de muro máxima mayor o igual a 15 metros e inferior a 30 metros, o bien de capacidad igual o superior a 1.500.000 m ³ e inferior a 60.000.000 m ³ .
C	Grandes	Altura de muro máxima igual o superior a 30 metros, o bien de capacidad igual o superior a 60.000.000 m ³ .

Para aquellos embalses que almacenen agua, o elementos transportados mediante ella, la altura de muro máxima será medida desde el coronamiento de la estructura resistente hasta el nivel del terreno natural, en un plano vertical que pasa por el eje del coronamiento. Además, se considerará como muro a las estructuras situadas sobre el nivel de terreno natural.

Para obtener la capacidad de los embalses que se encuentran dentro de cauces naturales, se debe calcular el volumen de almacenamiento de la obra hasta el nivel de agua generado por la crecida de diseño. Para aquellos embalses ubicados fuera de un cauce, la capacidad se determina hasta el nivel de coronamiento de estas obras.

Aquellas obras que sean clasificadas como Categoría B, deben entregar una descripción general del proyecto y una serie de documentos técnicos. Dentro de los documentos técnicos, se consideran:

1. Memorias
2. Planos
3. Especificaciones Técnicas

Para la elaboración de las memorias, acorde al artículo 20 de este decreto, se deben considerar:

- Estudios generales
- Diseño estructural e hidráulico
- Sistemas de control y monitoreo
- Planes para la inspección de seguridad
- Plan de puesta en carga de la obra
- Plan de operación normal
- Plan de emergencia
- Proyecto de desvío
- Plan de manejo de la información técnica

Los planos que deben ser incorporados, como mínimo, son:

- Plano de ubicación general
- Planta, perfiles y secciones que definan con claridad las obras
- Plano con la ubicación de los botaderos
- Planos de disposición general y de detalle de dispositivos destinados a control y monitoreo.
- Planos de inundación derivados del análisis de rotura

Por último, las especificaciones técnicas deben estar vinculadas claramente a cada obra proyectada, indicando los estándares de calidad y tipos de ensayos de los materiales de construcción, así como también las labores de control de calidad que se ejecutan. Así, se deben incluir, al menos, los siguientes documentos:

- Especificaciones técnicas generales de construcción
- Especificaciones técnicas especiales de construcción
- Especificaciones para la instalación del sistema de control y monitoreo
- Programa de construcción

El Título IV de este decreto trata sobre el diseño de las obras de los embalses de agua. El Párrafo II de este título se refiere al diseño de embalses de relaves y de embalses industriales, en particular, trata de aquellos criterios que se aplican a embalses de relaves con capacidad superior a cincuenta mil metros cúbicos o cuyo muro tenga más de 5 metros de altura.

El diseño hidráulico de estas obras debe considerar los siguientes puntos:

- Proyecto de desvío. Para esto, debe determinarse un periodo de retorno de la crecida de diseño, el cual debe ser tal que el riesgo hidrológico no supere el 5%. Si se tiene un caso donde la desviación del cauce natural del agua sea permanente, la obra de desvío debe ser diseñada para la crecida máxima probable.
- Canales de contorno. El periodo de retorno mínimo a considerar en su diseño es de 50 años, pero serán verificados para un periodo de retorno de 100 años.
- Crecida de diseño para el evacuador de seguridad. Se debe implementar un vertedero de seguridad, el cual debe operar durante toda la vida útil del embalse. De acuerdo a la categoría del embalse, se tienen los siguientes periodos de retorno:

Tabla 3.3: Periodos de retorno para diseño.

Categoría	Periodo de retorno
A	1.000 años
B	10.000 años
C	Crecida máxima probable

- Revancha mínima. Corresponde a la diferencia de niveles entre la carga recién definida y el coronamiento del muro. Para su cálculo, se deben considerar los siguientes factores:
 1. Efecto del viento sobre el embalse
 2. Altura de la ola causada por el viento, incluido el efecto de ascenso de la ola
 3. Asentamiento por consolidación del muro y/o de su cimentación
 4. Asentamiento dinámico causado por sismo

Para el cálculo del punto 4, se consideran las siguientes recomendaciones para el estudio sísmológico, de acuerdo con la categoría del embalse:

Tabla 3.4: Criterios de estudios sísmológicos.

Categoría	Estudio Sísmológico
A	Métodos simplificados para la obtención de la aceleración horizontal máxima del suelo.
B	Estudio sísmológico específico para la zona de emplazamiento de las obras, considerando aspectos determinísticos y determinísticos-probabilísticos, para la obtención del sismo máximo creíble y el sismo de diseño, respectivamente.
C	Mismas consideraciones que en Categoría B, aplicando además acelerogramas de sismos chilenos para una magnitud de, al menos, $M_s=8.5$.

El valor mínimo aceptado para la revancha será de 1 metro, el cual debe utilizarse cuando el cálculo genere valores inferiores.

- Control de filtraciones. Se deben tener en consideración, al menos las siguientes medidas:
 1. Se debe utilizar una geomembrana impermeable y otro material o solución equivalente, en el talud de aguas arriba, tanto en los muros de arena como en los de material de empréstito.
 2. El fondo de la cubeta debe ser impermeabilizado previo al llenado, con capas de material fino impermeable compactado, u otra solución que sea equivalente. No se permite la utilización de geomembranas. No considerar esta impermeabilización debe ser justificado mediante estudios y pruebas de campo del área de estudio.

3.1.5 Manual de Evaluación de Riesgo de Faenas Mineras Abandonadas o Paralizadas

Nace debido a que, a lo largo del tiempo, numerosas faenas mineras se fueron abandonando sin haber tenido un proceso adecuado de cierre, las que quedaron repartidas en distintos puntos del país. Estas instalaciones pueden representar un riesgo significativo para la seguridad y la salud de las personas, y para el medio ambiente.

Objetivos de este manual:

- Determinar cuáles de las faenas abandonadas o paralizadas presentan riesgos significativos para la salud o seguridad de las personas y/o el medio ambiente. Con esto se tiene un listado de pasivos ambientales mineros para todo el territorio nacional.
- Ordenar los pasivos ambientales mineros en función de sus riesgos, apoyando la toma de decisiones respecto a la remediación que harán las autoridades competentes.
- Ordenar de acuerdo a sus riesgos las faenas que se clasifiquen como pasivos ambientales mineros, para que la reevaluación, que se realizará de manera periódica, se efectúe en función de esta priorización.

El proceso se basa en una metodología ampliamente utilizada en diferentes ámbitos, denominada **Análisis Crítico de los Efectos de los Modos de Falla**, que permite diferenciar cuáles de las FMA/P constituyen un pasivo ambiental minero y cuales no presentan esta condición. Las etapas de la evaluación de riesgos son ocho y se explican a continuación, cuyo resultado es un listado de aquellas faenas que constituyen un PAM y otro de aquellos que no poseen esta condición. Cada listado estará ordenado de mayor a menor riesgo.

1. Identificación de Escenarios de Peligro:

Primer paso en la evaluación de riesgos. Comprende una exhaustiva revisión de las labores que contiene la faena minera, considerando los posibles receptores que estarían asociados a cada uno de los escenarios identificados. Los escenarios pueden ser de 2 tipos:

Aquellos relacionados con la **SEGURIDAD**: accidentes, caídas, derrumbes, contacto directo con productos corrosivos, etc., que requieren de una exposición directa con los elementos de una FMA/P y cuyos efectos suelen manifestarse de forma inmediata.

Aquellos relacionados con la **CONTAMINACIÓN** que puede producir una FMA/P y que requieren de un vehículo como el suelo, el aire o el agua para llegar a los receptores y producir los efectos no deseados. Normalmente los efectos negativos de la contaminación sobre los receptores se manifiestan en periodos prolongados de tiempo.

Se llena una tabla para seguridad y otra para contaminación, donde quedan registrados los Escenarios de Peligro para cada componente de la FMA/P.

2. Identificación de Receptores

Las FMA/P pueden afectar de manera negativa a alguno de los siguientes receptores:

- Personas
- Medio ambiente
 - Vida acuática
 - Vida silvestre terrestre
 - Áreas protegidas o sensibles
- Actividades económicas
 - Agricultura
 - Ganadería
 - Acuicultura y pesca

3. Evaluación de la Probabilidad de Ocurrencia

El riesgo de un Escenario de Peligro depende de la Probabilidad de Ocurrencia de dicho escenario y de la Severidad de sus Consecuencias.

La probabilidad de ocurrencia del escenario se estima mediante un **Índice de Probabilidad** que puede recibir un valor Alto, Medio, Bajo y Despreciable. Este índice evalúa en términos cualitativos cuán probable es el hecho de que se produzca un efecto negativo, y depende de las condiciones y circunstancias en que se encuentra en Escenario de Peligro.

4. Evaluación de la Severidad de las Consecuencias

Tabla 3.5. Criterios para definir la Severidad de las Consecuencias (Golder Associates, 2008) .

Receptores	Criterio para definir la Severidad de las Consecuencias	
	Seguridad	Contaminación
Personas	Lesiones físicas o pérdidas de vidas humanas	Daño a la salud humana
Medio Ambiente	Pérdida de superficie en donde se desarrolla vida acuática, terrestre o donde existan áreas protegidas o sensibles	Superficie potencialmente afectada donde se desarrolla vida acuática, terrestre o donde existen áreas protegidas o sensibles
Actividades Económicas	Pérdida de superficie de cultivos, ganado, de productos cultivados o extraídos de medios acuáticos	Superficie potencialmente afectada de cultivos, ganado, o de productos cultivados o extraídos de medios acuáticos

Para evaluar la severidad de las consecuencias, se establecen cinco categorías:

- Catastrófica
- Alta
- Moderada
- Baja
- Despreciable


La categoría Catastrófica se ha reservado a los Escenarios de Peligro que puedan afectar a personas, mientras que, para Medio Ambiente y Actividades Económicas, la severidad de mayor magnitud es Alta.

5. Aplicación de la Matriz de Riesgo

La Matriz de Riesgo (Tabla 3.6) es una tabla de doble entrada en la que, para cada combinación de valores de Probabilidad de Ocurrencia y Severidad de las Consecuencias, resulta un único valor de magnitud del riesgo.

Tabla 3.6. Matriz de riesgo (Golder Associates, 2008)

Índice Probabilidad	Severidad de las Consecuencias				
	Despreciable	Baja	Moderada	Alta	Catastrófica
Alto					
Medio					
Bajo					
Despreciable					



Cuanto más probable sea el Escenario de Peligro y cuanto más severas seas sus consecuencias, mayor será la magnitud del riesgo asociado a ese escenario en particular.

Tabla 3.7. Combinaciones de Probabilidad de Ocurrencia y Severidad de las Consecuencias (Golder Associates, 2008)

Índice Probabilidad	Severidad de las Consecuencias				
	Despreciable	Baja	Moderada	Alta	Catastrófica
Alto					
Medio					
Bajo					
Despreciable					

Se presenta así, en la Tabla 3.7, un conjunto de combinaciones de Probabilidad de Ocurrencia y Severidad de las Consecuencias que determinan niveles de riesgo más importantes o significativos (celdas en rojo), y otro conjunto de combinaciones en que los riesgos serían menores o no significativos (celdas en verde).

Se considera que un riesgo es SIGNIFICATIVO cuando reviste importancia debido a la combinación de las magnitudes que presentan los factores involucrados en su determinación.

Se considera que un riesgo es NO SIGNIFICATIVO cuando reviste menor importancia debido a la combinación de las magnitudes que presentan los factores involucrados en su determinación.

La Matriz de Riesgo tendrá tantas entradas como Escenarios de Peligro han sido identificados.

6. Pertinencia de realizar una Evaluación de Riesgos Detallada (ERD)

Cuando alguno de los riesgos evaluados mediante la evaluación de riesgos presenta algún nivel de incertidumbre, al punto que haga dudar de la validez de los resultados, puede ser necesaria la realización de una ERD.

La ERD se debe realizar cuando:

- La evaluación de riesgos simplificada (ERS) indica que los mayores riesgos detectados en la faena son no significativos y por lo tanto la faena no sería un PAM, pero existe incertidumbre acerca de la evaluación realizada de manera que podría haberse subestimado algún riesgo.
- La ERS determina que existen uno o varios riesgos significativos y, por lo tanto, la FMA/P se clasificaría como PAM, pero la evaluación realizada presentó en todos estos riesgos un grado de incertidumbre tal que pudiera ser que todos ellos hubiesen sido sobreestimados, siendo en realidad no significativos.

No procede realizar una ERD cuando existe suficiente seguridad respecto a la presencia o ausencia de riesgo significativos, por lo cual las respectivas faenas pueden ser clasificadas como PAM o no PAM con certeza.

7. Evaluación de riesgos debido a la proximidad de otras faenas

Se verifica si existen otras FMA/P cuyas áreas de estudio ingresen o se solapen con la primera. En el caso de que sí existiese, se requiere realizar una redefinición del área de estudio y de los receptores presentes en ésta, evaluando los posibles efectos acumulativos que tendrán los escenarios de peligro que están próximos entre sí.

Una vez actualizada la definición del área de estudio, se requiere revisar la Evaluación de Riesgos Simplificada de cada FMA/P, considerando que en esta área puede ahora haber nuevos receptores, que anteriormente no fueron considerados.

8. Clasificación de las Faenas en PAM y NO PAM

Se ha establecido un criterio principal consistente en definir como Pasivo Ambiental Minero aquella FMA/P que presenta uno o más riesgos que fueron catalogados como “significativos” durante su evaluación. A esta categoría se le denominará **Clase I**.

Se establece además que una FMA/P no constituye un PAM cuando carece de riesgos significativos para cualquiera de los Escenarios de Peligro Identificados. Estas faenas se consideran de **Clase II** y requieren de una evaluación periódica a lo largo del tiempo. La periodicidad con que se realice la reevaluación estará determinada por la aplicación de los criterios técnicos que defina el SERNAGEOMIN.

Existe un tercer grupo denominado **Clase III** y comprende todas aquellas faenas mineras que durante el análisis demostraron riesgos despreciables, por lo que no requieren de mayor evaluación en esta etapa.

FMA/P	Clase	Descripción
PAM	I	Faenas en las cuales se ha identificado a lo menos un riesgo significativo para la salud o seguridad de las personas, el medio ambiente o actividades económicas.
NO PAM	II	Faenas para las cuales todos los riesgos se han considerado como no significativos, y requiere de evaluación periódica.
NO PAM	III	Faenas con riesgos despreciables según la metodología, que no requieren de una nueva evaluación de riesgos bajo la metodología del manual.

3.1.6 Evaluaciones de Impacto Ambiental y Resoluciones de Aprobación

En Chile, algunos proyectos deben ser sometidos al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), ya sea presentando una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA). La última se presenta en caso de que el proyecto genere o presente alguno de los siguientes efectos:

1. Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones y residuos.
2. Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluido el suelo, agua y aire.
3. Reasentamiento de comunidades humanas, o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de los grupos humanos.
4. Localización en o próxima a poblaciones, recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos, glaciares, susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar.

5. Alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona.
6. Alteración de monumentos, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural.

Según el Decreto 40, el cual aprueba el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, se debe someter a esta evaluación a aquellos proyectos que sean susceptibles a causar un impacto en el medio ambiente, en cualquiera de sus etapas. Dentro de estos proyectos, se encuentran los embalses o tranques. Además, de acuerdo con la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente, estos proyectos sólo podrán ejecutar o modificarse con una previa evaluación de impacto ambiental.

El Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) tiene a disposición en su página web, tanto las declaraciones como las evaluaciones de impacto ambiental de proyectos públicos. Se hizo una revisión de evaluaciones de impacto ambiental de proyectos relacionados con la depositación de relaves, con el objetivo de identificar los parámetros que se monitorean y cuáles son los instrumentos más utilizados. En la Tabla 3.8 se presenta un resumen de instrumentos utilizados en algunos depósitos de relaves.

Tabla 3.8. Instrumentos de monitoreo en depósitos de relave (Fuente: SEA)

Instrumento	Depósito					
	Las Cruces II	El Mauro	Humo Corral	Minera Florida	Sector 5	El Torito
Piezómetro	5, uno en cada pozo de control	20 Casagrande 57 eléctricos estáticos 16 eléctricos dinámicos	17	4 en el interior del depósito	8 a lo largo de depósito	A lo largo del muro separados 200 a 250 [m] entre sí 3 dinámicos en el muro
Acelerógrafo		2				X
Topografía		X	3	5 puntos de control	6 puntos de control	X
Asentímetro		6				X
Caudalímetro		X				
Pozo de Control	5 aguas abajo		2 aguas abajo	X	3	3 aguas abajo
Flujómetro						3, uno por cada tubería de relave
Manómetro						3

Por otro lado, las resoluciones de aprobación corresponden a documentos generados por el Servicio Nacional de Geología y Minería, quienes revisan los proyectos presentados por las empresas mineras. Esta revisión se hace acorde lo indicado en las leyes, decretos y reglamentos relacionados con la disposición de relaves mineros.

Para el desarrollo de este trabajo se revisó una serie de documentos, de los cuales se desprendieron los parámetros críticos que se utilizan para definir la metodología del índice de estabilidad física, explicada más adelante.

3.1.7 Guías de Buenas Prácticas

Las guías de buenas prácticas son documentos que recopilan aquellas acciones que se realizan tanto durante la construcción y operación como monitoreo y control, y que ayudan a tener un buen desempeño de un depósito de relaves. Generalmente, estas acciones se desprenden de faenas mineras cuya implementación ha dado buenos resultados, por lo que se recomienda su aplicación a otras mineras.

Si bien las guías de buenas prácticas pueden variar en términos de contenido y exhaustividad, la mayoría tiene documentos de orientación que cumplen con lo que debería ser una guía de buenas prácticas.

Estos documentos son reconocidos a nivel internacional, los cuales mencionan las siguientes causas generales de falla en depósitos de relaves:

- Falta de control del balance hídrico, gatillando un rebalse.
- Falta de control en la construcción, principalmente en la calidad de ésta.
- Falta general de entendimiento de los requisitos que tiene el control en la operación segura.
- Falta de responsabilidad por parte de los operadores, los cuales se deben a problemas de gobernanza

En términos de estabilidad física, el ICMM (International Council on Mining and Metals) indica que una guía de buenas prácticas debe contar con los siguientes elementos:

Gestión Interna: Las empresas mineras deben contar con un marco que regule la gestión de relaves, el cual debe ser aprobado y cumplido por todas las faenas pertenecientes a la empresa. Esto proporciona una base para la gestión eficaz de relaves y los controles y seguimientos legales que deben realizarse. Dentro de los elementos principales, se destaca la consideración de gestión integral del ciclo de vida que abarca la concepción, investigación y caracterización de sitio, construcción, operación y cierre, considerando además la continuidad entre estas fases, además de un compromiso con el proceso formalizado de gestión de cambio.

Estos objetivos y principios deben elaborarse de tal forma que se evite la generalidad y ambigüedad en la guía. Además, aquellas personas que sean responsables deben ser previstos de los recursos necesarios para su ejecución.

Gobernanza: La guía debe insistir en la importancia que debe tomar la gobernanza con un sistema de gestión que asegure una frecuencia y un nivel de inspecciones, auditorías y revisiones de cada fase del proyecto, indicando además los requisitos que deben cumplir quienes realizan este trabajo.

Al igual que para la gestión interna, los elementos de gobernanza deben ser explicados con un nivel de detalle que elimine la incertidumbre y que asegure la implementación de las distintas medidas.

Requisitos Mínimos de Proyecto: Debe indicarse cuáles son los requisitos que deben ser cumplidos para las etapas de diseño, construcción, operación y cierre. Dentro de estos requisitos, se destaca que la minera debe contar con un plan operativo para cada fase del proyecto. Este plan debe incluir el efecto de las características del depósito de relaves, como el método constructivo, y las consecuencias que genera la falta de cumplimiento de la guía.

En la sección de Anexos se presenta una lista de normativas y de guías de buenas prácticas, tanto nacionales como internacionales.

3.2 Estudios Asociados a Estabilidad Física

En esta sección se presentan los principales estudios utilizados como base para el desarrollo de la metodología de evaluación de estabilidad física de depósitos de relaves.

3.2.1 Desarrollo de Herramientas de Evaluación y Criterios Técnicos para asegurar la Estabilidad Física de Instalaciones Remanentes

Corresponde al proyecto INNOVA 15BP-45433, que se está llevando a cabo en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, el cual nace debido a la falta de detalle respecto a criterios técnicos de la Ley 20.551 que Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras. Estos criterios hacen referencia principalmente a cómo se debe evaluar y garantizar la estabilidad física de las instalaciones en el tiempo, lo que genera la necesidad de desarrollar guías técnicas que entreguen las líneas a seguir en el desarrollo de planes de cierre.

Así, el principal objetivo de este proyecto es “generar y/o adaptar herramientas tecnológicas y criterios técnicos que permitan elaborar una guía para evaluar y asegurar la estabilidad física de instalaciones remanentes, acorde a las exigencias de la Ley 20.551” (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2017)

Los objetivos que se busca cumplir en el desarrollo del proyecto son:

- Realizar un diagnóstico nacional e internacional de criterios, procedimientos, herramientas y soluciones tecnológicas vigentes, para evaluar y asegurar la estabilidad física de faenas mineras en la etapa de cierre y post cierre.
- Desarrollar y validar una guía técnica, para evaluar y asegurar la estabilidad física de instalaciones remanentes en la fase de cierre y post cierre, aplicable en la mediana y gran minería de Chile.
- Transferir a empresas mineras, consultoras de ingeniería y organismos fiscalizadores, mediante diferentes instrumentos de difusión, los criterios técnicos, procedimientos, herramientas y soluciones tecnológicas, que se hayan determinado durante el desarrollo del proyecto.

La guía que se plantea en este proyecto busca ser un documento técnico que aporte orientaciones generales, para seleccionar métodos de evaluación de la estabilidad física de instalaciones remanentes en las etapas de cierre y post-cierre. Su funcionamiento se resume en la Figura 3.1.

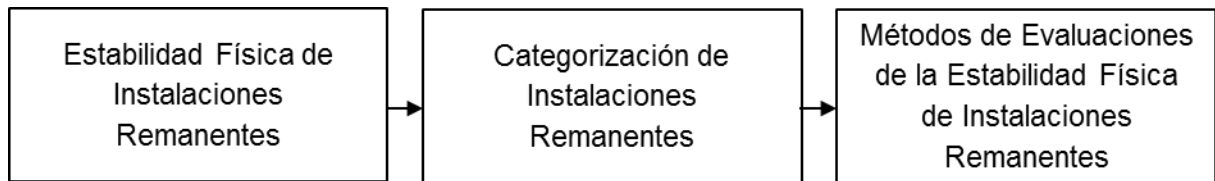


Figura 3.1. Esquema de evaluación planteado por PUCV

La categorización que ellos proponen para los depósitos de relaves chilenos sigue la siguiente metodología:

1. Establecer el potencial de inseguridad
2. Establecer el potencial de ocurrencia de falla
3. Seleccionar la categoría de análisis de estabilidad física aplicables a depósitos de relaves
4. Seleccionar los métodos para analizar la estabilidad física en depósitos de relaves en las etapas de evaluación de cierres y cierres definitivos

Etapa 1: Potencial de inseguridad

Consiste en determinar el escenario potencial de inseguridad al momento de realizar la evaluación. Para esto, se considera cuatro factores, donde a cada uno se le asigna un puntaje de acuerdo con el grado de inseguridad que genera. Este grado se define en función de rangos o estados en los que se encuentra el depósito. La Tabla 3.9 muestra los factores considerados y sus respectivos puntajes asignados.

Tabla 3.9. Tabla de clasificación de potencial de inseguridad (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2017)

Factor	Potencial de Inseguridad			
	Mayor	Alto	Medio	Bajo
Altura del depósito [m]	30 (6)	15 – 30 (4)	5 – 15 (2)	< 5 (0)
Volumen de almacenamiento máximo del depósito [m ³]	60.000.000 (6)	1.500.000 – 60.000.000 (4)	50.000 – 1.500.000 (2)	< 50.000 (0)
Número de personas a evacuar, aguas abajo	1000 (20)	999 – 101 (4)	100 – 1 (2)	0 (0)
Impacto medioambiental	Catastrófico (12)	Mayor (8)	Moderado (4)	Menor (0)

La suma de los puntajes obtenidos de la Tabla 3.9, se denomina Factor Total De Inseguridad (FTI) y, de acuerdo con este valor, se determina el Grado de Inseguridad del depósito. Esta clasificación se muestra en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Grado de Inseguridad (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2017)

Factor Total de Inseguridad (FTI)	Grado de Inseguridad
0 -12	I (Bajo)
12 - < 20	II (Significativo)
>20	III o IV (Alto o Extremo)

Etapa 2: Clasificación de Estabilidad

Consiste en clasificar la estabilidad de un depósito de relaves al momento de realizar la evaluación. Para esto, se consideran los siguientes factores:

- Geometría del depósito
- Calidad de los relaves
- Métodos de construcción
- Tipo de suelo de fundación del depósito
- Grado de implementación de medidas para asegurar la estabilidad física en etapa de cierre
- Niveles piezométricos
- Sismicidad del sector

Estos factores se obtienen ya sea en base al juicio de expertos, o como parte del diseño y control de la operación del depósito. El detalle de cada uno y sus ponderaciones asociadas se presenta en Anexos, mientras que el resultado final de esta etapa se muestra en la Tabla 3.11. Es importante mencionar que, al momento de asignar la ponderación propuesta, el especialista encargado debe considerar si la cantidad y la calidad de la información es suficiente para asignar dicha ponderación.

Tabla 3.11. Potencial de Ocurrencia de Falla (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2017)

Mecanismo	Factores Asociados	Puntaje Total	Potencial de Ocurrencia de Fallas
Licuefacción Sísmica	-Configuración geométrica del depósito -Tipo de depósito y método de construcción -Calidad de la compactación -Calidad de las arenas de relaves -Nivel piezométrico en el depósito de relaves -Sismicidad del sector de emplazamiento	< 200	Estable
		200 – 400	Límite
		≥ 400	Probable de Inestabilidad
Inestabilidad de Taludes	-Configuración geométrica del depósito -Tipo de depósito y método de construcción -Calidad de la compactación -Calidad de las arenas de relaves -Nivel piezométrico en el depósito de relaves -Características del suelo de fundación -Sismicidad del sector de emplazamiento	0	Estable
		200	Límite
		400	Probable de Inestabilidad
Licuefacción Estática	-Tipo de depósito y método de construcción -Calidad de la compactación -Calidad de las arenas de relaves -Nivel piezométrico en el depósito de relaves	< 200	Estable
		200 – 400	Límite
		≥ 400	Probable de Inestabilidad
Overtopping	-Configuración geométrica del depósito de relaves -Grado de implementación de obras y acciones para asegurar la estabilidad física	< 300	A (Bajo)
		200 – 500	B (Significativo)
		≥ 500	C (Alto o extremo)
Pipping	-Nivel de compactación alcanzado durante la totalidad de la etapa operacional -Granulometría y plasticidad de la fracción fina (< 80 μm) -Instrumentación y monitoreos (niveles freáticos, presiones de poros, sistema de drenaje basal)	< 400	A (Bajo)
		400 – 600	B (Significativo)
		≥ 600	C (Alto o extremo)

Etapa 3: Selección de categoría de análisis de estabilidad física

En esta etapa se cruzan los resultados de las etapas anteriores, a través de una matriz, la cual permite seleccionar el nivel de la metodología de análisis de la evaluación de estabilidad física:

Tabla 3.12. Matriz de selección de categoría de métodos de análisis (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2017)

Potencial de Ocurrencia de Falla (Resultado Etapa 2)	Potencial de Inseguridad (Resultado Etapa 1)		
	Bajo	Significativo	Alto o Extremo
Estable	Menor	Moderado	Mayor
Límite	Moderado	Moderado	Mayor
Probabilidad de Inestabilidad	Moderado	Mayor	Mayor

Etapa 4: Selección de Métodos

Ésta corresponde a la última etapa, y consiste en seleccionar el método a utilizar para analizar la estabilidad física del depósito de relaves. A la actualidad, se ha desarrollado esta etapa para tres de los cinco mecanismos de falla planteados. Estos resultados se muestran en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Métodos de análisis según categoría y mecanismo de falla (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2017)

Categorías de Análisis	Métodos de análisis para diferentes modos de falla		
	Estabilidad de taludes estática y sísmica	Licuefacción sísmica	Licuefacción Estática
Menor	-Métodos de equilibrio límite estático y pseudoestático -Evaluar si es necesario un análisis de deformaciones simplificado	-Métodos basados en ensayo in-situ	-Métodos basados en ensayos in-situ
Moderado	-Métodos de equilibrio límite estático y pseudoestático -Análisis de deformaciones simplificado	-Métodos basados en ensayos in-situ y en laboratorio	-Métodos basados en ensayos in-situ y en laboratorio
Mayor	-Métodos numéricos (elementos finitos, diferencias finitas, elementos discretos)	-Métodos numéricos (elementos finitos, diferencias finitas, elementos discretos)	-Métodos numéricos (elementos finitos, diferencias finitas, elementos discretos)

3.2.2 Diagnóstico de la Situación Actual de Tranques de Relaves de la V Región

Corresponde al trabajo de tesis para optar al título de Ingeniero Constructor en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, de Claudio Carvajal y Álvaro Pacheco. El objetivo de su trabajo es proponer una metodología que permita evaluar la situación de los tranques de relave de la pequeña y mediana minería, considerando tanto aspectos de estabilidad estructural como de impacto ambiental. Con esto, se busca identificar los depósitos de relaves que se encuentren en las peores condiciones y que requieren con urgencia algún tipo de intervención.

Esta iniciativa nace debido a la preocupación por el manejo adecuado de los tranques de relaves, debido a que el pasivo ambiental que la industria minera deja va en aumento y es difícil de dimensionar. Esto despierta particular interés en la V región, donde un número importante de depósitos se encuentran cercano a centros de población humana, zonas de cultivo y cursos de agua, generando la necesidad de hacer un diagnóstico que incluya la componente ambiental.

El método de evaluación propuesto por Carvajal y Pacheco (2004) consiste en una matriz de doble entrada, mediante la cual se procesan los datos que provienen de una ficha de catastro. Estos datos reciben una calificación según su estado, y una ponderación acorde a la influencia que tiene sobre cada condición. Con los resultados de esta matriz, es posible generar un ranking de los tranques de relaves de acuerdo con las condiciones en que se encuentra. Con esta herramienta, se busca facilitar la toma de decisiones en situaciones relacionadas con la estabilidad y/o la rehabilitación de un determinado tranque de relaves.

En primer lugar, se define una metodología a seguir para realizar un catastro de depósitos de relaves, considerando un catastro como un registro donde se reúne información referente a la ubicación y a las principales características de estos depósitos, ubicados, en este caso, dentro de una determinada zona geográfica. En este trabajo, la metodología de catastro se enfoca en dimensionar la magnitud del problema que los depósitos de relaves generan en la Quinta Región.

Luego de realizado el catastro, se deben procesar los datos recopilados en éste, evaluando, para cada depósito las condiciones ambientales y de estabilidad. El principal objetivo de esta herramienta es generar un diagnóstico de la situación actual de los tranques de relaves de la Quinta Región. El resultado de este diagnóstico es una calificación para cada condición ambiental y de estabilidad de cada tranque de relaves, la cual permite seleccionar aquellos depósitos que requieren con mayor urgencia ser estabilizados y/o rehabilitados.

La metodología seguida en este trabajo se presenta esquemáticamente en la Figura 3.2, donde la primera etapa de la metodología corresponde a la recopilación de antecedentes, los cuales incluyen:

- Características de los sectores donde se desarrolla la actividad minera.
- Proceso del cobre.
- Métodos de disposición de residuos mineros.

- Características de los tranques de relave.
- Control de operación, cierre y abandono.
- Estudios realizados anteriormente.
- Actuales requerimientos ambientales.

En la segunda etapa de la metodología, se desarrollan de manera paralela, el estudio de las condiciones de estabilidad que puede presentar un tranque de relaves, y las condiciones ambientales que pueden ser afectadas en forma negativa por la presencia o posible falla de estos depósitos.

La tercera etapa corresponde a identificar los principales factores que intervienen en la estabilidad de depósito, y aquellos que influyen en el daño medioambiental causado. Estos factores dependen tanto del depósito en sí como del entorno en el que se construyen.

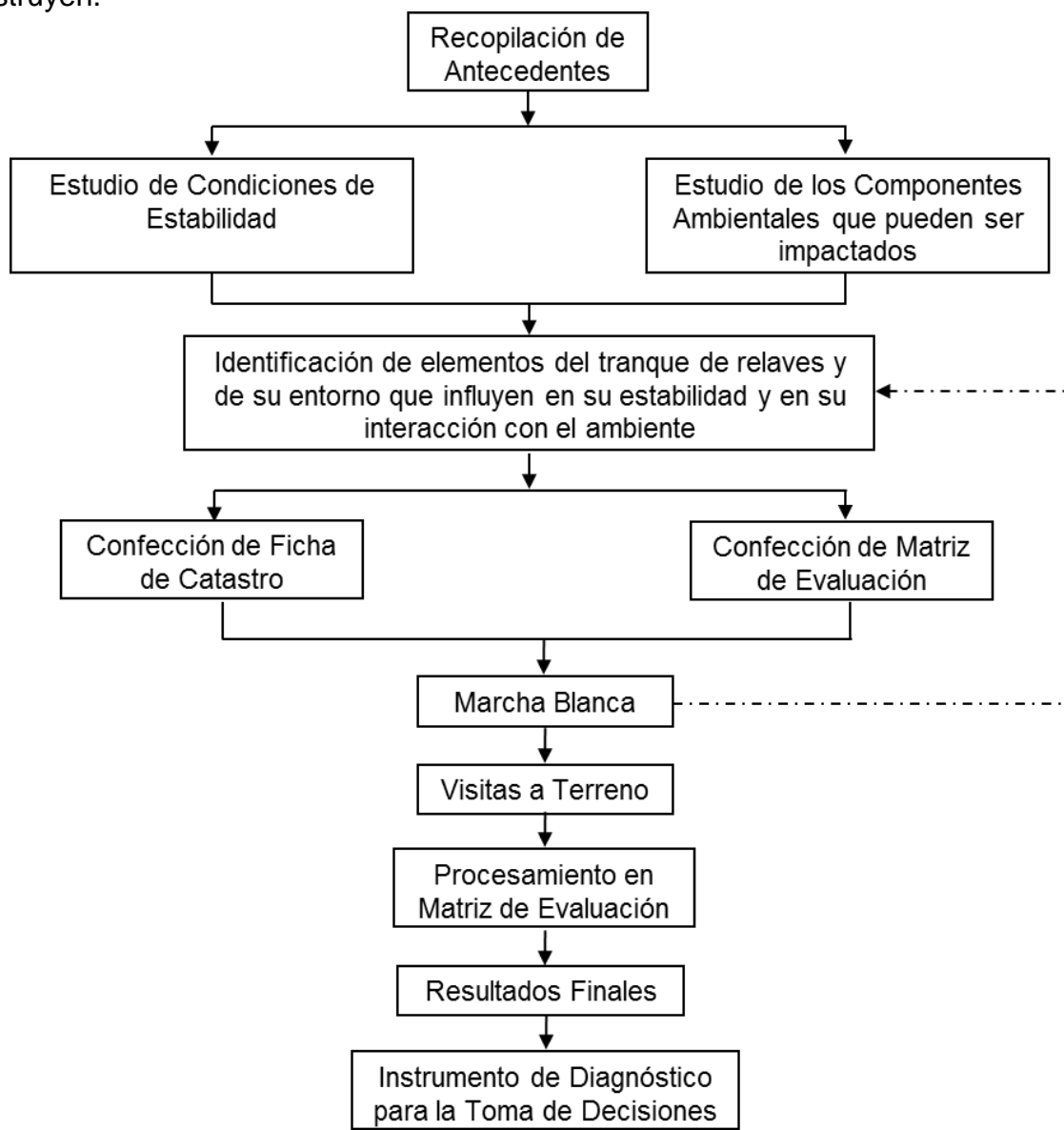


Figura 3.2. Metodología de trabajo (Modificado de Carvajal y Pacheco, 2004)

Con estos factores identificados, se procede a confeccionar la ficha de catastro y la matriz de evaluación. La primera permite recolectar los datos de terreno para cada tranque de relaves, mientras que la segunda permite procesar estos datos.

Luego de esto, se realiza la aplicación de la metodología, la cual inicia con una marcha blanca con visitas a terreno. La marcha blanca permite detectar elementos de los depósitos o de su entorno, que influyen en la estabilidad o en su interacción con el medio ambiente. Posteriormente, se procesa la matriz de evaluación, se analizan los resultados finales y se plantean instrumentos para tomar decisiones.

Los datos utilizados en la realización del catastro se consiguieron siguiendo distintos procedimientos. Esto debido a que la ficha busca responder una gran cantidad de preguntas. Estos procedimientos son los siguientes:

- Identificación y ubicación del tranque de relaves
- Características técnicas del tranque de relaves
- Parámetros geotécnicos y características de los relaves
- Condiciones climáticas e hidrológicas
- Efectos ambientales
- Elementos de monitoreo, estabilización y rehabilitación

Luego, el mecanismo que procesa la información catastrada consiste, como ya se mencionó, en una matriz de doble entrada, donde las filas están compuestas por los factores de campo asociados, y las columnas corresponden a las condiciones de estabilidad que se busca evaluar. Los factores de campo son “aquellos parámetros del tranque de relaves provenientes de la ficha de catastro y que son considerados dentro de la matriz de evaluación” (Carvajal & Pacheco, 2004). Para la construcción de esta matriz se siguieron estos pasos:

1. Definición de las condiciones a evaluar
2. Definición de los factores de campo
3. Asignación de calificaciones
4. Asignación de factores de importancia (ponderadores)

La calificación y el factor de importancia son definidos para cada mecanismo de falla considerado, que en este caso son los siguientes:

- Estabilidad mecánica del talud
- Estabilidad frente a erosión
- Estabilidad hidrológica
- Calidad de agua
- Calidad del aire
- Flora
- Fauna
- Paisaje
- Población humana

Los resultados de estabilidad de este estudio se muestran en Figura 3.3. Uno de los principales resultados del trabajo es que se puede obtener una evaluación general y específica para cada tranque de relaves, permitiendo encontrar aquellos que presentan problemas muy puntuales. Además, la metodología desarrollada puede ser fácilmente modificada y aplicada a otras regiones del país.

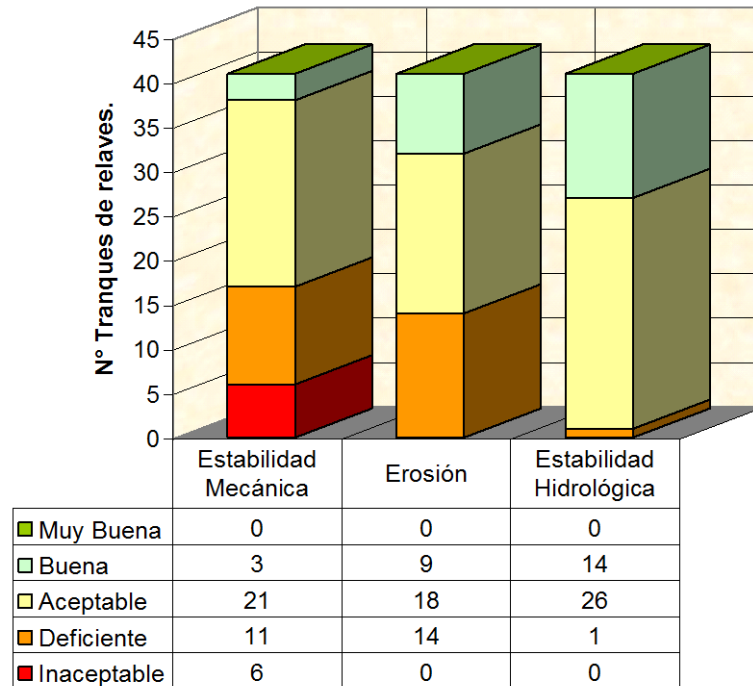


Figura 3.3. Resultados del Diagnóstico de Estabilidad (Carvajal & Pacheco, 2004)

Otro resultado destacable de este trabajo es la utilización de factores de importancia, tanto para cada factor como para cada campo. De acuerdo con los autores, esta etapa corresponde a la más subjetiva dentro de la metodología propuesta, pues depende de la prioridad que se le quiera dar a cada condición, por lo que queda a disposición de las preocupaciones de cada institución. Además, este método permite realizar de manera simultánea, las evaluaciones de las condiciones ambientales y de estabilidad de un depósito de relaves.

3.2.3 Análisis de Árboles de Falla de Depósitos de Relaves Convencional y Espesados

Corresponde al trabajo de tesis de Genki Taguchi, de la Universidad de British Columbia, el cual responde a la pregunta: ¿se puede desarrollar una metodología para evaluar si un depósito de relaves filtrado tiene menor probabilidad de falla que un depósito de relave convencional?

El objetivo de esta investigación es desarrollar una metodología para la estimación de probabilidades de fallas de los diferentes tipos de depósitos de relaves, mediante análisis de árboles de falla. Los árboles de falla permiten analizar de manera gráfica la generación de una situación crítica. Este esquema comienza con alguna condición de falla, seguida por todas las posibles cadenas de eventos que podrían conducir a esa falla. Este método es ampliamente utilizado para determinar la probabilidad de un accidente o una falla funcional particular.

En términos generales, el primer paso para desarrollar un árbol de falla es identificar el evento crítico o no deseado, el que va ubicado en la parte superior del esquema. A partir de este evento, se deben identificar las posibles causas directas, las cuales, de llegar a ocurrir, conducen directamente al evento no deseado, además de las causas intermedias. Esta metodología se realiza hasta que no se encuentren más causas y no se pueda continuar con el proceso de ramificación. La Figura 3.4 muestra un árbol de falla simplificado con los conceptos principales.

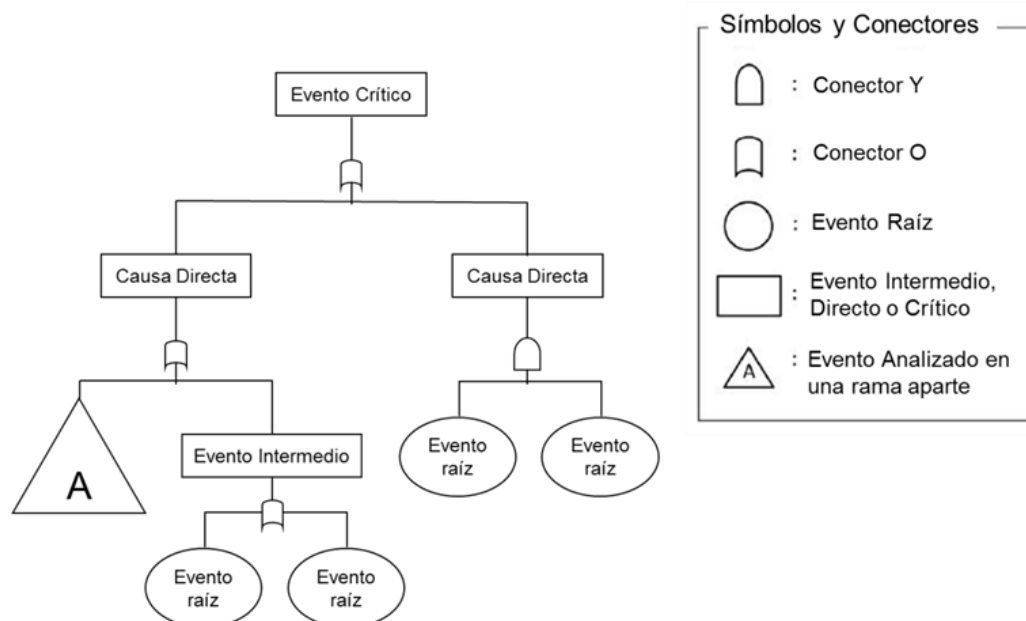


Figura 3.4. Árbol de Falla General (Modificado de Taguchi, 2014)

En este estudio, Taguchi desarrolla árboles de falla para los siguientes mecanismos de falla:

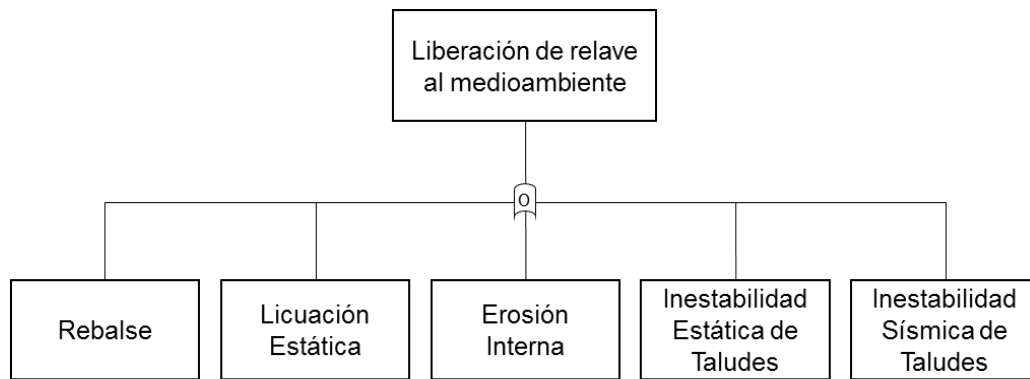


Figura 3.5. Árbol de Falla para determinar la probabilidad de liberación de relaves (modificado de Taguchi, 2014)

Esta selección de mecanismo está basada en una revisión de experiencias internacionales con el diseño y el rendimiento de las distintas formas de depositar relave en la industria. Las siguientes figuras muestran los árboles de falla correspondientes a inestabilidad estática de taludes, inestabilidad sísmica de taludes, erosión interna y rebalse:

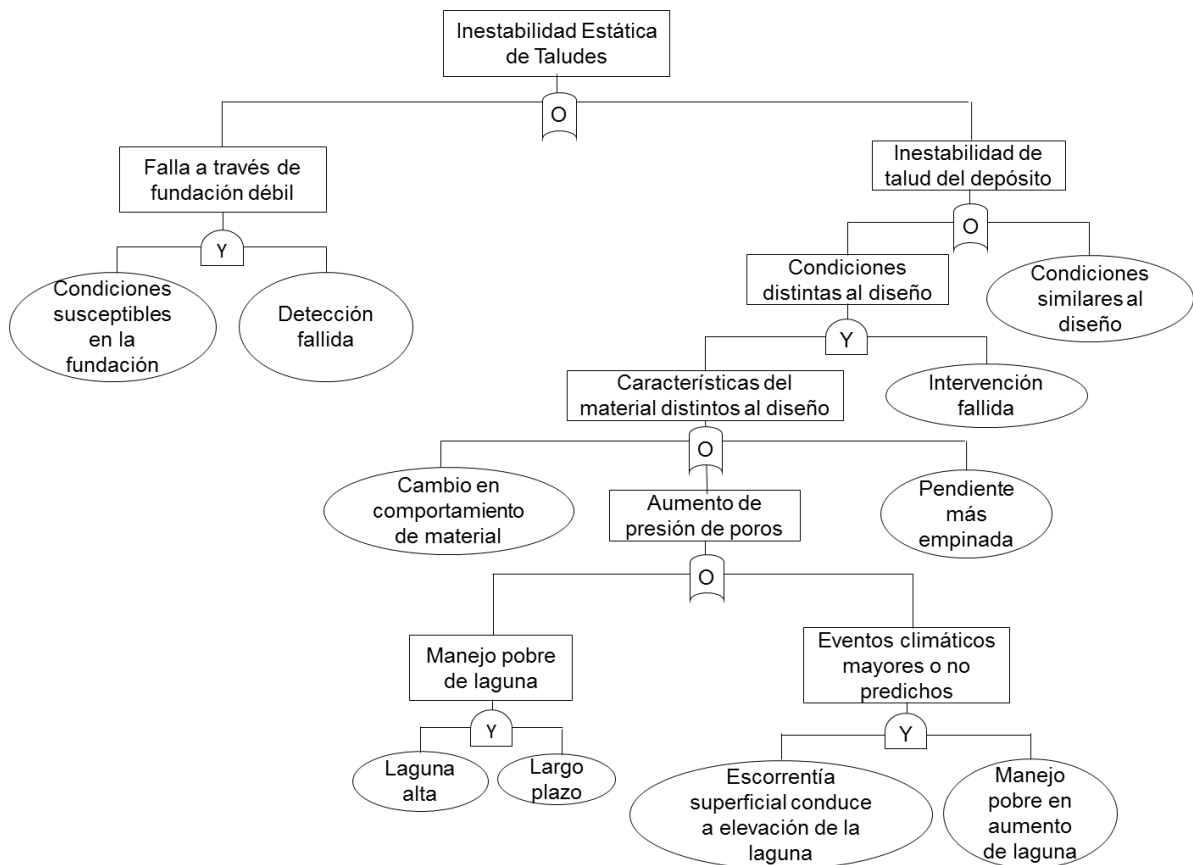


Figura 3.6. Árbol de Falla para Inestabilidad Estática de Taludes (modificado de Taguchi, 2014)

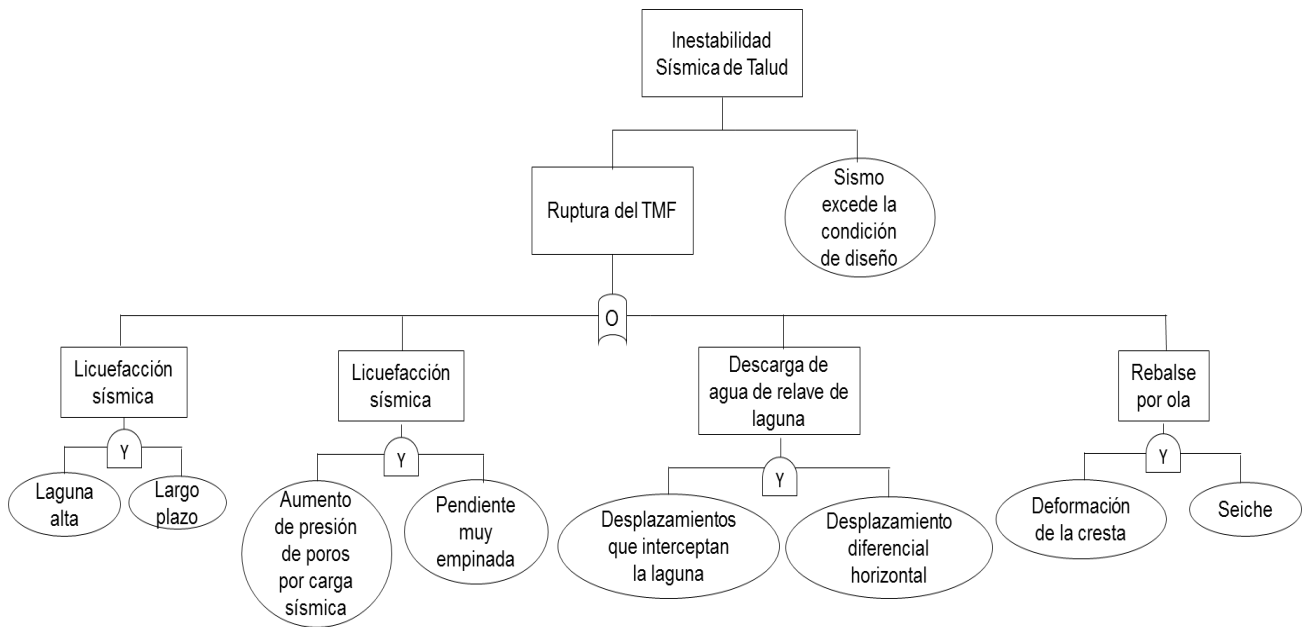


Figura 3.7. Árbol de Falla para Inestabilidad Sísmica de Taludes (modificada Taguchi, 2014)

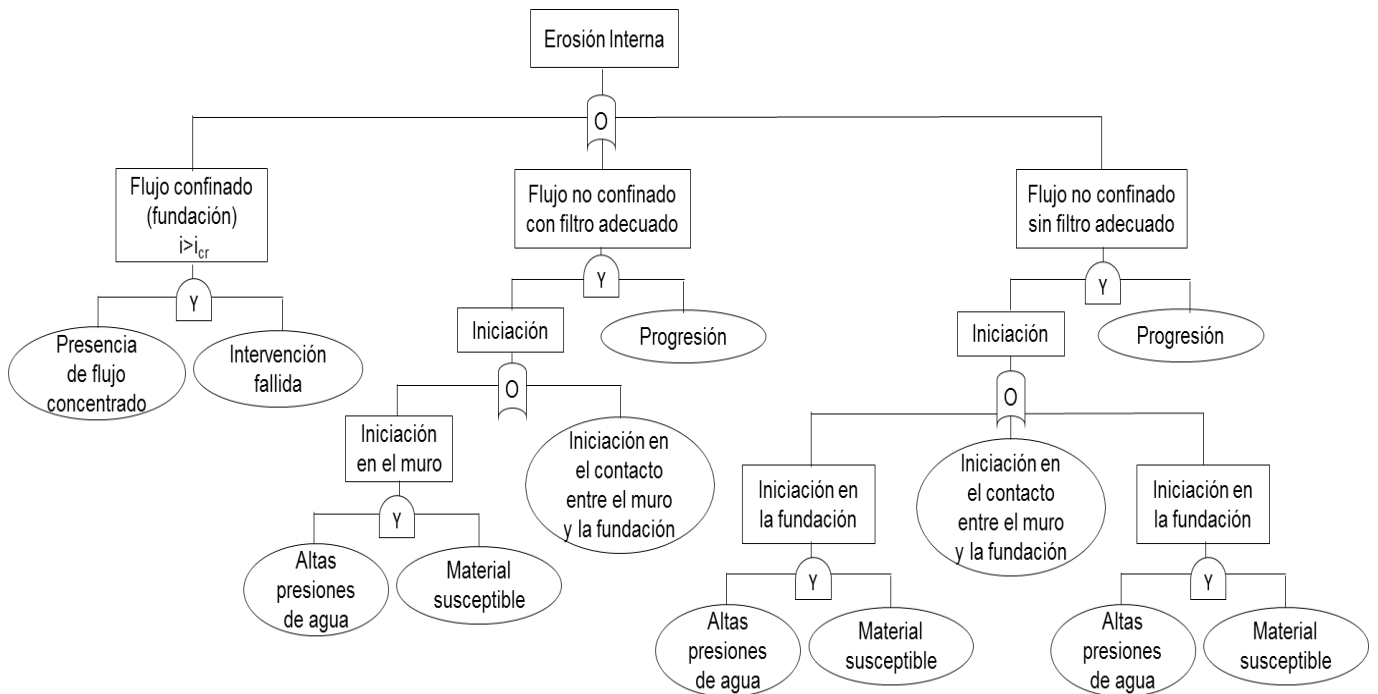


Figura 3.8. Árbol de Falla para Erosión Interna (modificada de Taguchi, 2014)

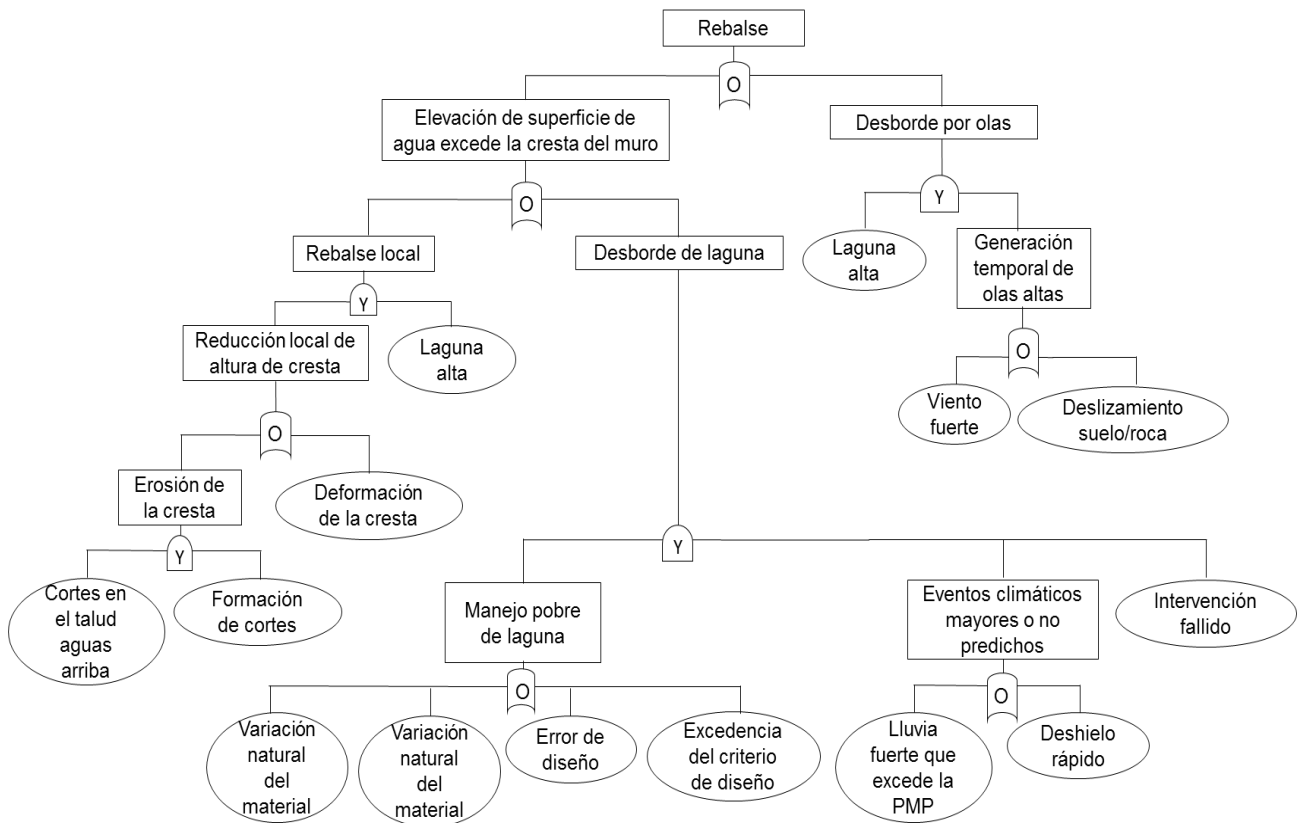


Figura 3.9. Árbol de Falla para Rebalse (modificada de Taguchi, 2014)

Para la elección de probabilidades de los eventos y causas raíces (llamados también Eventos Básicos), se utiliza el juicio de expertos, debido a que no pueden ser calculadas en base a modelos probabilísticos de condiciones sitio-específicas. En este caso, el juicio de expertos fue dado por Dirk Van Zyl, considerando el asesoramiento adicional de Jack Caldwell. Estas probabilidades se consideran para un depósito de relaves convencional con construcción aguas arriba representativa de la industria minera internacional. Los valores de estas probabilidades se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 3.14. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para Inestabilidad Estática de Taludes (Taguchi, 2014)

Causa Raíz	Probabilidad de Ocurrencia
Condiciones susceptibles en la fundación	0,0100
Detección fallida	0,0050
Cambios en el comportamiento del material	0,0020
Pendiente más empinada	0,0020
Laguna alta	0,0050
Largo plazo	0,0050
Escorrentía superficial conduce a un aumento en la elevación del agua	0,0100
Mal manejo del aumento de la laguna	0,0050
Intervención fallida	0,0050
Condiciones similares al diseño	0,0001

Tabla 3.15. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para Inestabilidad Sísmica de Taludes (Taguchi, 2014)

Causa Raíz	Probabilidad de Ocurrencia
Material contractivo	0,0500
Situación no saturada	0,0050
Aumento de presión de poros por carga sísmica	0,0050
Pendiente muy empinada	0,0020
Desplazamientos que interceptan la laguna	0,0200
Desplazamiento diferencial horizontal	0,0100
Deformación de la cresta	0,0025
Seiche	0,0050
Movimiento de tierra excede el de diseño	0,0050

Tabla 3.16. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para Erosión Interna (Taguchi, 2014)

Causa Raíz	Probabilidad de Ocurrencia
Presencia de flujo concentrado	0,0100
Intervención fallida	0,0050
Altas presiones de agua	0,0050
Material susceptible	0,0050
Iniciación de erosión en el contacto del muro y la fundación	0,0100
Progresión	0,0050
Altas presiones de agua	0,0100
Material susceptible	0,0050
Iniciación de erosión en el contacto del muro y la fundación	0,0100
Altas presiones de agua	0,0100
Material susceptible	0,0050
Progresión	0,0200

Tabla 3.17. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para Rebalse (Taguchi, 2014)

Causa Raíz	Probabilidad de Ocurrencia
Cortes en el talud de aguas arriba	0,0100
Formación de cortes/desprendimiento de material	0,0200
Deformación de la cresta del muro	0,0025
Laguna alta	0,0050
Ingreso de relave excede la capacidad original	0,0050
Variación natural del mineral	0,0050
Error de diseño	0,0050
Excedencia en criterio de diseño	0,0100
Lluvia fuerte que excede la PMP	0,0100
Deshielo rápido	0,0100
Mala realización de intervención	0,0050
Laguna alta	0,0050
Vientos fuertes	0,0100
Deslizamiento de suelo o roca	0,0010

Se hizo un análisis de sensibilidad a los resultados de los cuatro mecanismos de falla considerados, variando la probabilidad de cada evento raíz en $\pm 20\%$ y $\pm 50\%$, con el fin de encontrar aquellas causas de mayor influencia. La Tabla 3.18 muestra las probabilidades iniciales. Los resultados se presentan a continuación, donde se observa que mientras más cerca del Evento No Deseado se encuentre la causa raíz, mayor será su efecto en el resultado final. Además, al comparar ambos gráficos para cada mecanismo de falla, se desprende que no hay relación entre la probabilidad de ocurrencia de la causa raíz, con su efecto en el valor final.

Tabla 3.18. Probabilidad inicial de cada mecanismo de falla (Taguchi, 2014).

Mecanismo de Falla	Probabilidad Inicial
Inestabilidad Estática de Taludes	$1,70 \times 10^{-4}$
Inestabilidad Sísmica de Taludes	$2,36 \times 10^{-6}$
Rebalse	$3,02 \times 10^{-4}$
Erosión Interna	$1,16 \times 10^{-4}$

Inestabilidad Estática de Taludes:

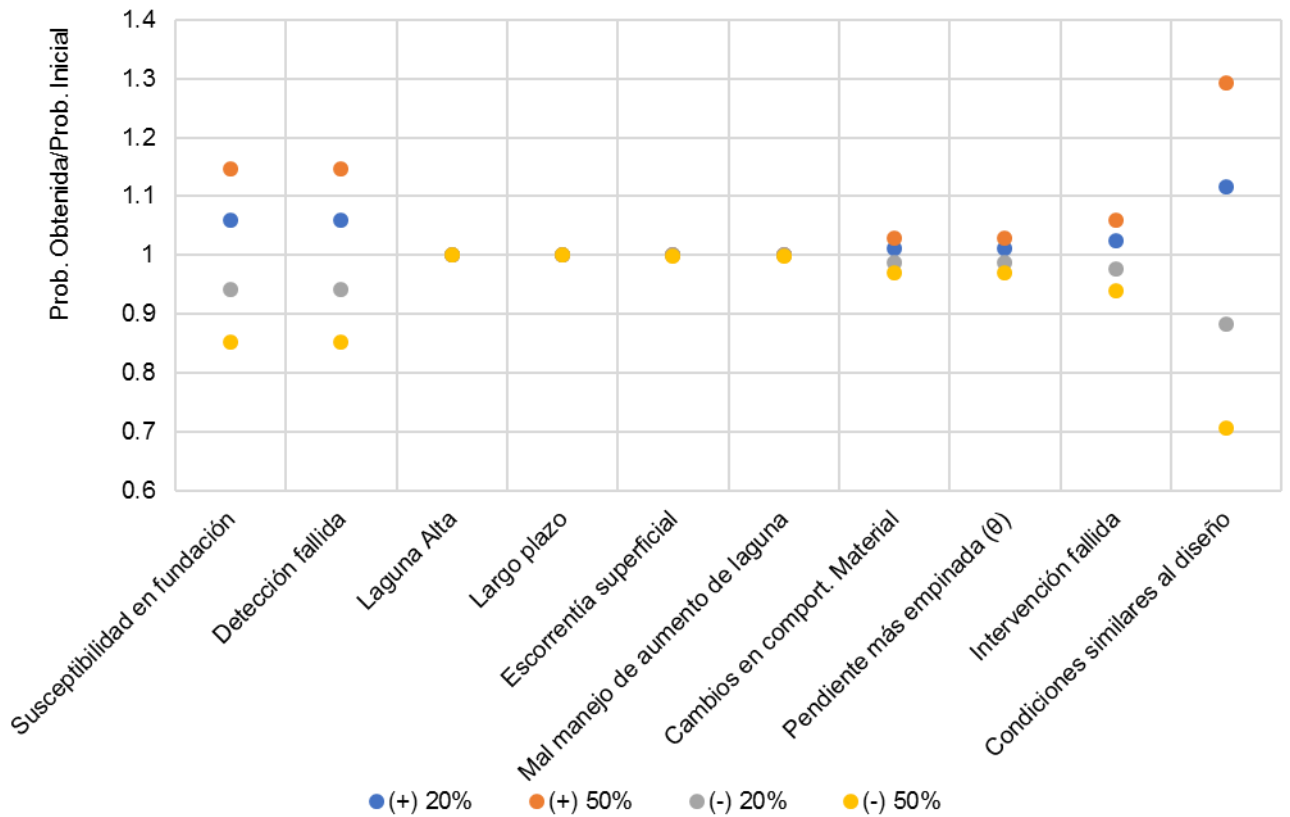


Figura 3.10. Variación de Parámetros considerada en Análisis de Sensibilidad para Inestabilidad Estática de Taludes.

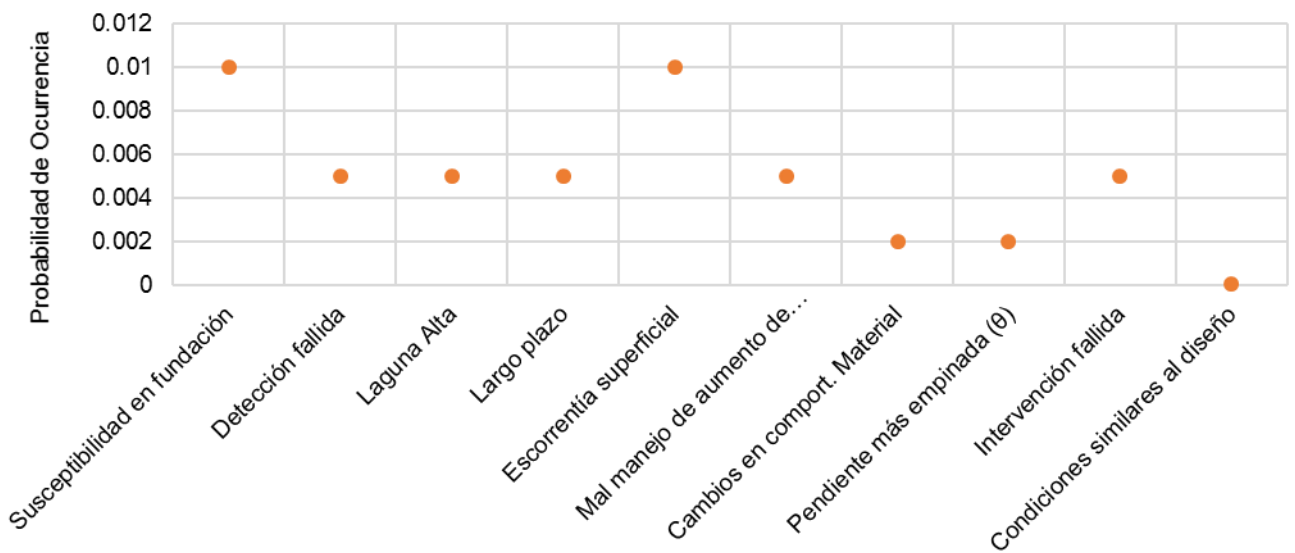


Figura 3.11. Probabilidad de ocurrencia de cada causa raíz, inestabilidad estática de taludes.

Inestabilidad Sísmica de Taludes:

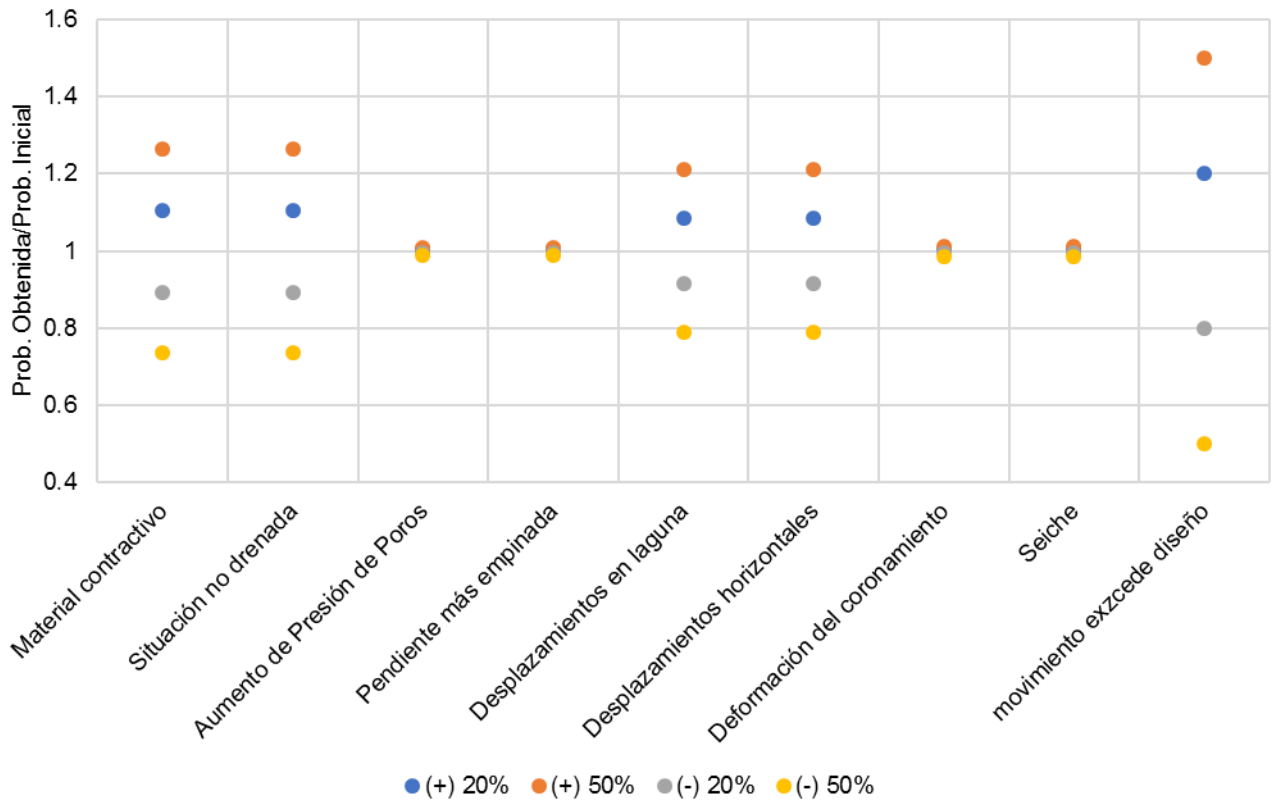


Figura 3.12. Variación de Parámetros considerada en Análisis de Sensibilidad para Inestabilidad Sísmica de Taludes.

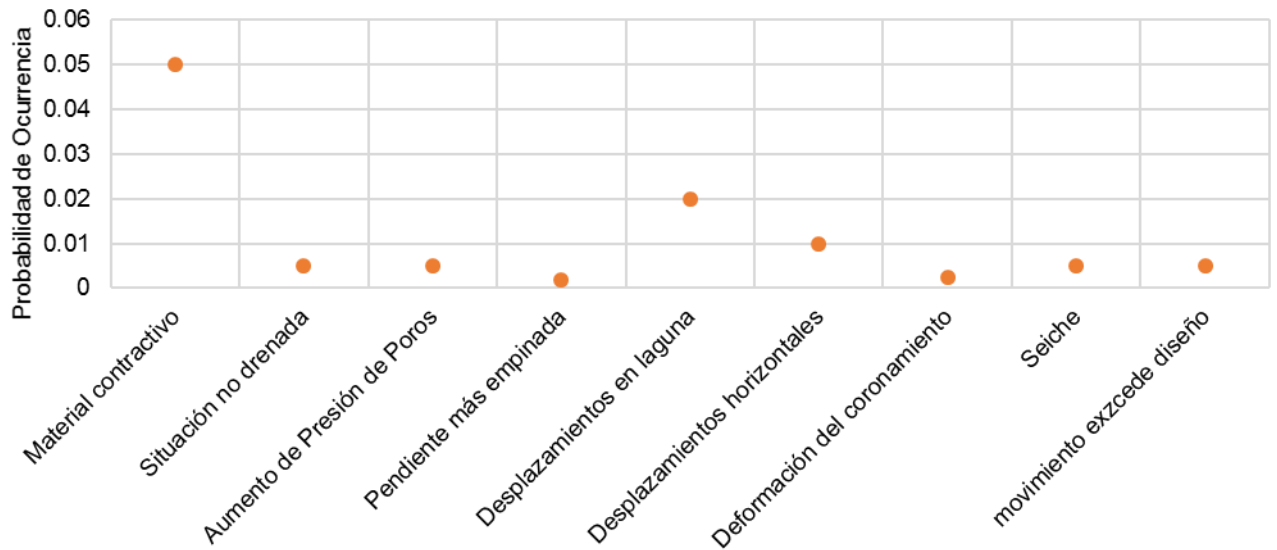


Figura 3.13. Probabilidad de ocurrencia de cada causa raíz, inestabilidad sísmica de taludes.

Erosión Interna

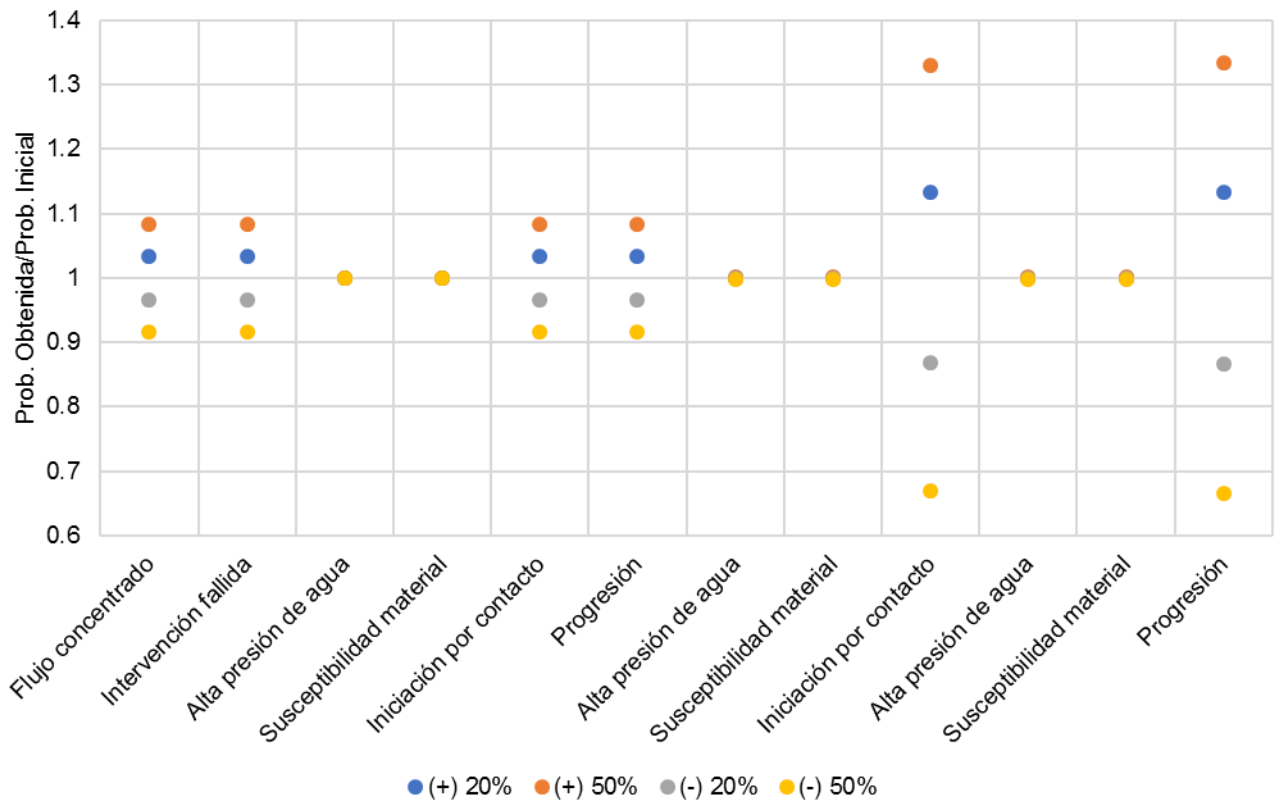


Figura 3.14. Variación de Parámetros considerada en Análisis de Sensibilidad para Erosión Interna.

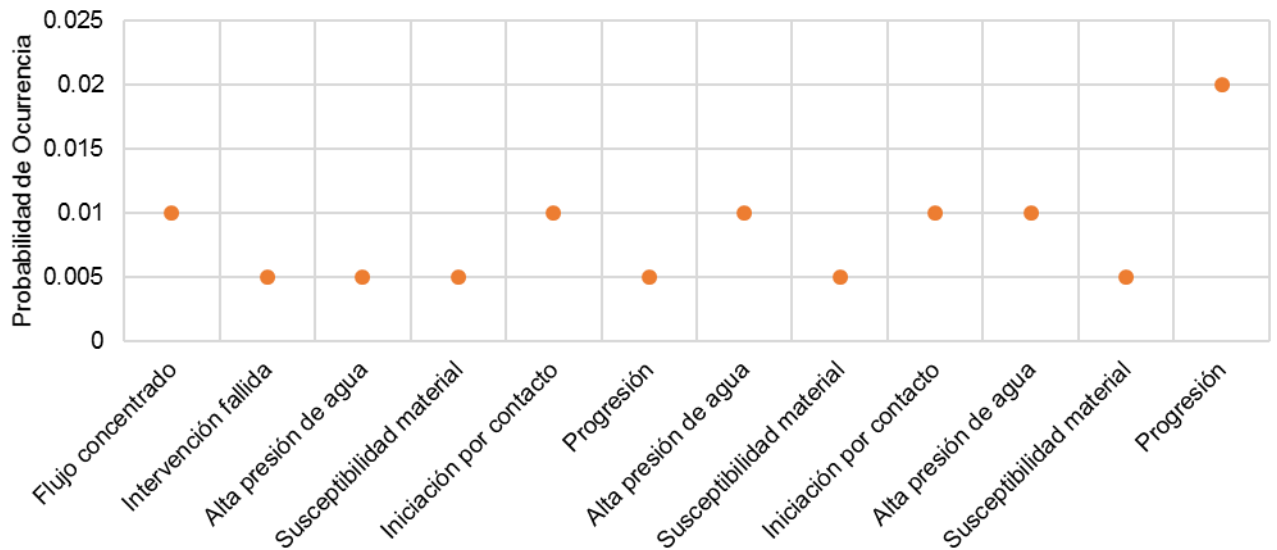


Figura 3.15. Probabilidad de ocurrencia de cada causa raíz, erosión interna.

Rebalse

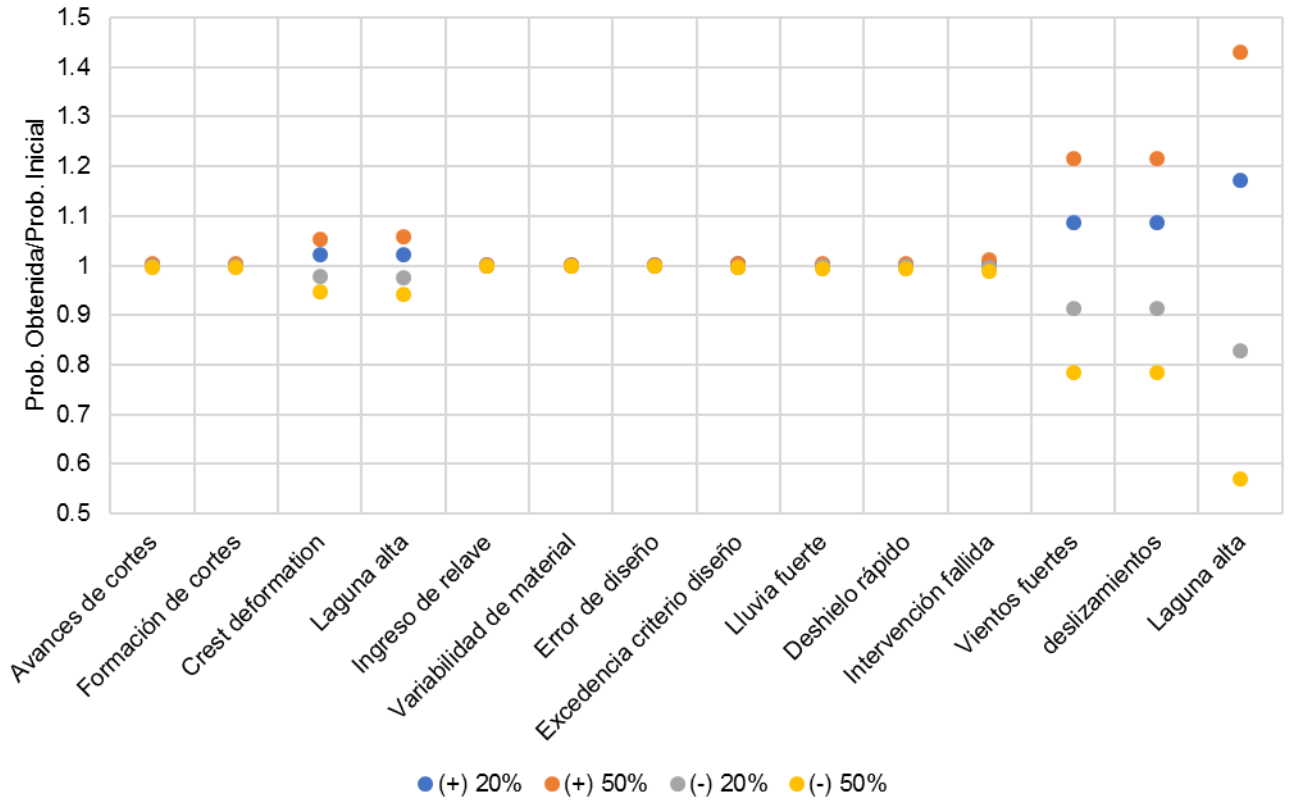


Figura 3.16. Variación de Parámetros considerada en Análisis de Sensibilidad para Rebalse.

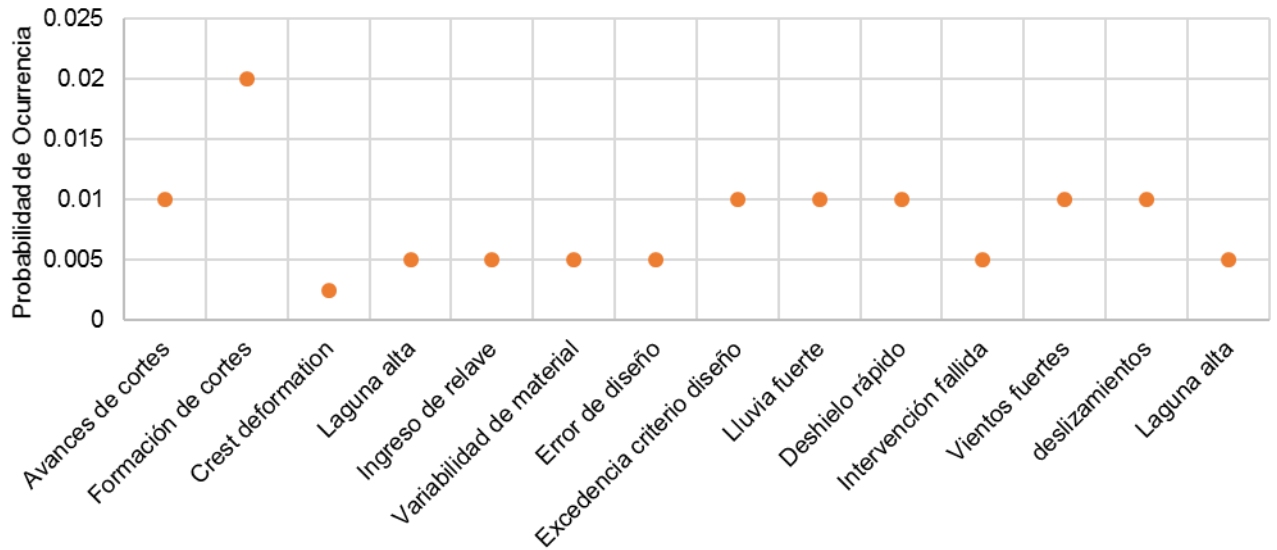


Figura 3.17. Probabilidad de ocurrencia de cada causa raíz, rebalse.

3.2.4 Evaluación de Falla de Presas de Relaves con el Método del Árbol de Fallas

Corresponde a la tesis de Máster Universitario en Minería Sostenible de Sonny de la Cruz, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, de la Universidad Politécnica de Madrid, en marzo de 2017. El objetivo principal de este trabajo es definir una metodología utilizando Árboles de Falla, que permita determinar las causas que condicionan la falla de una presa de relaves. Para esto, se elabora una base de datos con fallas mundiales, con lo cual es posible establecer las principales causas de falla, para luego evaluar la probabilidad de ocurrencia de la falla, mediante FTA (Fault Tree Analysis).

En lo que respecta al Árbol de Falla, de la Cruz lo define como “*un modelo gráfico de caminos que se puede dirigir a un pronosticable evento indeseado*”. Los caminos se conectan con los eventos y/o condiciones mediante conectores lógicos (Y u O). Las probabilidades de ocurrencia se propagan a través del modelo, a fin de evaluar la probabilidad del evento pronosticable y no deseado.

Aplicar esta metodología contribuye a:

- Identificar aquellos contribuidores potenciales de falla que son críticos.
- Mejorar el conocimiento acerca de las características del sistema.
- Tener una mirada cualitativa y cuantitativa hacia el interior de la probabilidad del evento.
- Identificar los recursos implicados en prevenir la falla.

Para armar este árbol, se deben seguir las siguientes etapas:

1. Identificar el *top-event* indeseable.
2. Identificar el primer nivel de causas contribuidoras.
3. Establecer la relación del primer nivel con el *top-event*.
4. Identificar el segundo nivel de causas contribuidoras.
5. Establecer la relación del segundo nivel con el *top-event*.

Se debe destacar que cada suceso no deseado puede tener un árbol de falla, y que los *top-event* representan altas pérdidas potenciales, por lo que la severidad del acontecimiento o la ocurrencia de éste pueden producir un alto riesgo.

En este caso, las probabilidades se estimaron en función de una base de datos de fallas. Las fuentes de información utilizadas corresponden a datos medidos, escenarios familiares, datos publicados, registro de incidentes históricos y experiencia y/o juicio profesional. La Figura 3.18 muestra el Árbol de Falla definido por de la Cruz (2017), donde la rama asociada a la primera causa directa corresponde a una serie de causas que afectan a la presa en sí, obtenidas de la revisión de la base de datos. Las probabilidades de los elementos de esta rama se obtuvieron a partir del conocimiento de presas que han fallado. La rama asociada a la segunda causa directa corresponde a la cadena de acontecimientos que determinan la gravedad del suceso marcado por el Análisis de Riesgo Potencial. Las probabilidades de los elementos de esta rama se obtuvieron de estudios realizados con anterioridad y es un valor sugerido a un nivel alto de daño.

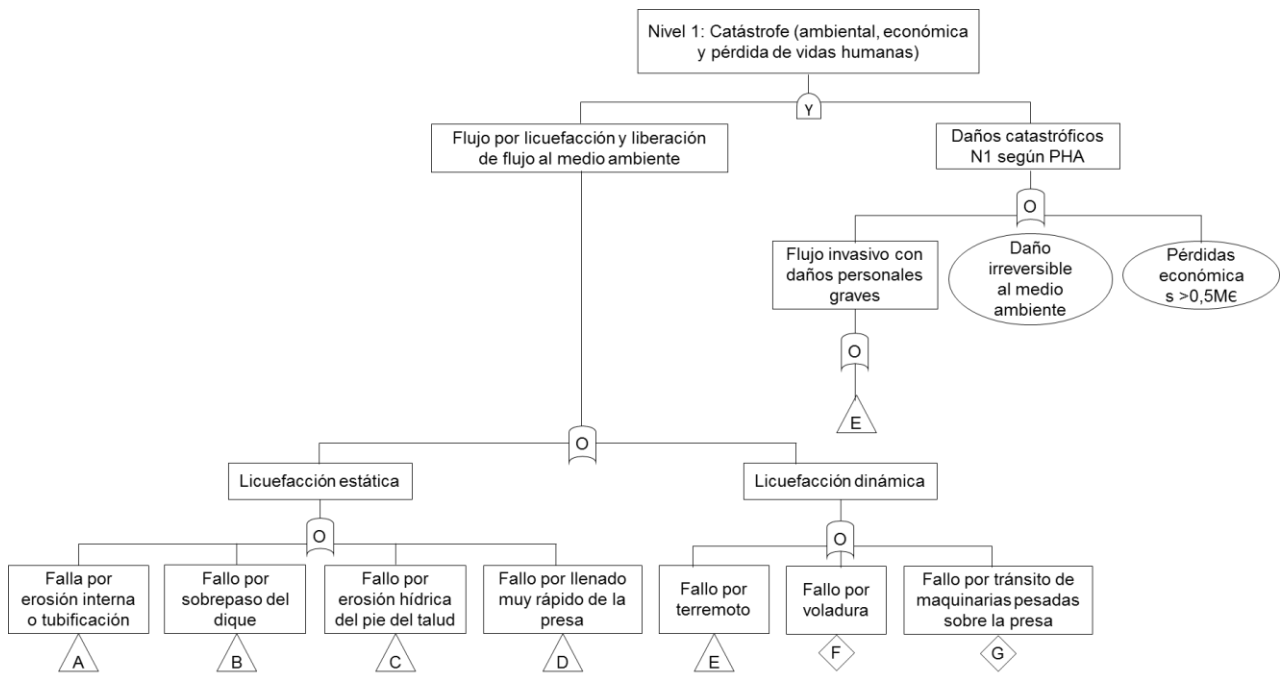


Figura 3.18. Árbol de Falla de Depósitos de Relave (de la Cruz, 2017).

3.3 Análisis de Estudios

Respecto a las normas anteriormente expuestas, se puede observar que existe poco control sobre la gran cantidad de variables presentes en un depósito de relaves mineros, siendo sólo algunos exigidos por el Servicio Nacional de Geología y Minería, a través de, principalmente, el reporte E700. Este reporte, si bien debe ser entregado de forma trimestral, no son claras las fechas en las cuales fueron tomados los datos presentados. Además, y a pesar de que estas normas entregan algunos lineamientos para cumplir con la estabilidad del depósito, se entiende la necesidad de Guías de Buenas Prácticas cuyo uso pueda ser aplicado a cualquier depósito de relaves, dado que corresponde a una herramienta útil para identificar áreas de preocupación para el diseño de nuevos sistemas o para mejorar las instalaciones existentes, ayudando además a reducir el riesgo al corregir o mitigar los problemas.

En relación con los estudios revisado en detalle, del proyecto INNOVA, llevado a cabo por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, se destaca la definición de factores que permiten establecen el potencial de inseguridad y de ocurrencia de falla, además de aquellos que ayudan a clasificar la estabilidad del depósito. Sin embargo, tiene un enfoque específico en los depósitos en etapa de cierre. Por otra parte, la tesis de Carvajal y Pacheco, también de la PUCV, presenta un detallado catastro que permite reunir información asociada al depósito en sí y su entorno, lo que ayuda a tener una visión más completa de estas obras y de sus posibles consecuencias sobre el medio ambiente. Lamentablemente, la metodología planteada tiene un alto grado de subjetividad, además de pasar por alto características técnicas.

Respecto al análisis mediante árboles de falla, se considera que es una herramienta gráfica de fácil entendimiento, pero no así de fácil implementación, ya que la asignación de probabilidades de ocurrencia a cada causa o evento raíz puede depender del juicio de expertos y/o profesionales competentes, o de datos históricos de fallas que se recopilan a lo largo del tiempo. La elección de alguna de estas afectará el resultado final.

En función de lo anterior, se busca definir una metodología que permita, de forma completa, estudiar la estabilidad de depósitos de relaves, la cual se puede hacer considerando tres aspectos: características propias del depósito y su entorno, valores de los parámetros críticos, y la combinación de causas y eventos mediante un árbol de falla.

Así, es posible hacer una evaluación de características y condiciones asignando puntajes de acuerdo a su estado, lo que permite conocer de forma rápida si alguna característica necesita ser reevaluada o mejorada. Además, de la revisión de normativa nacional es posible seleccionar aquellos parámetros que tienen efecto directo sobre la estabilidad física de los depósitos. A éstos se les denomina Parámetros Críticos, debido a la influencia que tienen en el comportamiento del depósito. Por último, mediante árbol de falla se puede analizar la condición de estabilidad física de un depósito, evaluando cada causa raíz con probabilidades determinadas por juicio de expertos.

4 Análisis de Mecanismos de Falla

En función de los documentos revisados, se propone que los principales mecanismos que generan la falla de los depósitos de relaves se pueden agrupar en tres:

- Inestabilidad de Taludes.
- Erosión Interna.
- Rebalse

Cada mecanismo de falla tiene, por un lado, sus propios parámetros cuyo monitoreo y control, así como un cambio en sus valores, genera una situación de inestabilidad. A estas propiedades cuantificables se les denomina Parámetros Críticos, y pueden afectar la estabilidad física de un depósito de forma individual o acoplado con otros parámetros. Por otro lado, se definen los Eventos Gatilladores, que corresponden a situaciones o intervenciones de tipo natural o antrópica que interviene en la estabilidad física de un depósito (Advanced Mining Technology Center, 2017). Además, se tienen distintos métodos y modelos para estudiar y/o predecir la ocurrencia de una falla controlada por cada mecanismo.

4.1 Inestabilidad de Taludes

De acuerdo con Knight (2015), considerar la estabilidad de taludes de un depósito de relaves es vital tanto en su fase de diseño como en la construcción y operación. En general, la estabilidad de taludes queda determinada por la geometría del muro, ya sea por su altura como por la inclinación de estos, las propiedades del material del suelo, la naturaleza del suelo de fundación y el nivel de compactación, principalmente.

En términos generales, en muros de arena y material de empréstito es posible observar fallas de taludes de tipo plana. La rotura plana es aquella en que la superficie de falla es paralela al talud y la longitud de esta superficie puede considerarse infinita en relación con el espesor de la masa que falla. Este tipo de falla se presenta en la Figura 4.1

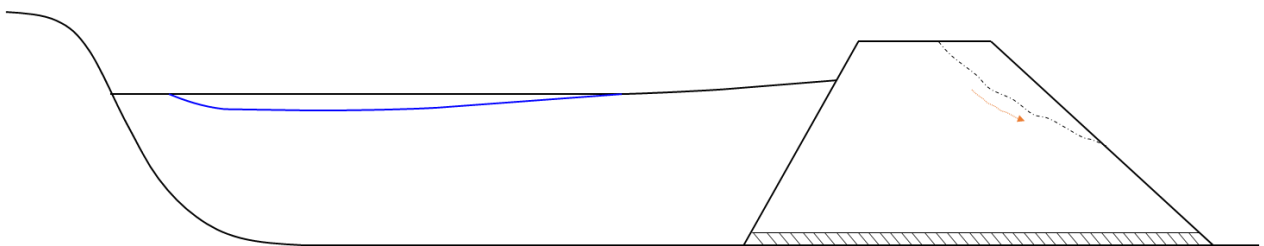


Figura 4.1. Esquema de Falla Plana – Inestabilidad de Taludes.

El diseño del talud debe ser tal que asegure que la estructura sea capaz de soportar las potenciales condiciones de carga esperadas durante la vida del depósito (Knight, 2015). Esta estabilidad se refleja a través del cálculo de un factor de seguridad que asegure que riesgo de que ocurra una falla sea aceptablemente bajo.

4.1.1 Parámetros Críticos e Instrumentación

La Tabla 4.1 muestra los instrumentos que se utilizan en Chile, en terreno para monitorear los parámetros críticos asociados a inestabilidad de taludes, mientras que la

Tabla 4.2 presenta los ensayos usados con el mismo propósito.

Tabla 4.1. Instrumentos utilizados para controlar los parámetros críticos.

Parámetros Críticos	Instrumentos
Nivel freático en depósito y muro	Piezómetros
Presiones de poros en depósito y muro	Piezómetros
Geometría del muro	Topografía, fotogrametría
Aceleraciones sísmicas del muro	Acelerómetros
Desplazamientos del muro	Celdas de asentamiento
Fenómenos de subsidencia	Celdas de asentamiento

Tabla 4.2. Ensayos utilizados para controlar parámetros críticos

Parámetros Críticos	Ensayos
Granulometría del material del muro	Análisis granulométrico
Rigidez y resistencia del material	CPT dinámico
Sistema de drenaje y recirculación	Inspección visual, caudalímetro, turbidímetro
Nivel de compactación	SPT, CPT, Proctor

4.1.2 Eventos Gatilladores

A continuación, se muestran los eventos que se considera que podrían gatillar una falla por inestabilidad de taludes. En ellos, (N) indica que es de carácter natural y (O) que ocurre en la etapa de operación del depósito.

- Lluvias que generen variaciones en el contenido de humedad del depósito, y cambios en el nivel freático (N). Al subir el nivel freático, la resistencia del suelo disminuye, haciendo que el talud sea más inseguro. Además, éste queda más propenso a deslizamientos de material debido a las precipitaciones.
- Sismos que generen licuefacción de alguno de los materiales (N)
- Licuefacción estática (N, O). Puede ocurrir por un aumento en la velocidad de carga del material dentro del depósito.
- Cargas asociadas a mayores disposiciones de relave con respecto al diseño original (O). Esto podría generar una fuerza sobre el muro mayor a la de diseño, gatillando la falla de éste.
- Reducción del prisma resistente mediante excavaciones en el pie del muro (O)
- Colapso del sistema de drenaje (N, O), el cual puede colapsar debido a una sobrecarga o a un incumplimiento del criterio de filtro.

Para el caso de los sismos, de acuerdo con Sanhueza & Rodríguez (2013), su efecto depende tanto de la magnitud Richter del terremoto, como de los valores de los coeficientes de aceleración sísmica, los que dependen de la distancia entre el punto evaluado y el epicentro del evento.

4.2 Erosión Interna

Corresponde a la migración de material a través del muro de contención, dando lugar a la formación de un conducto que permite la circulación de agua y/o relave. La cavidad resultante favorece el progreso de la erosión, la cual puede generar una falla local o global del depósito o de su suelo de fundación.

La Figura 4.2 presenta un esquema general de una falla por erosión interna.

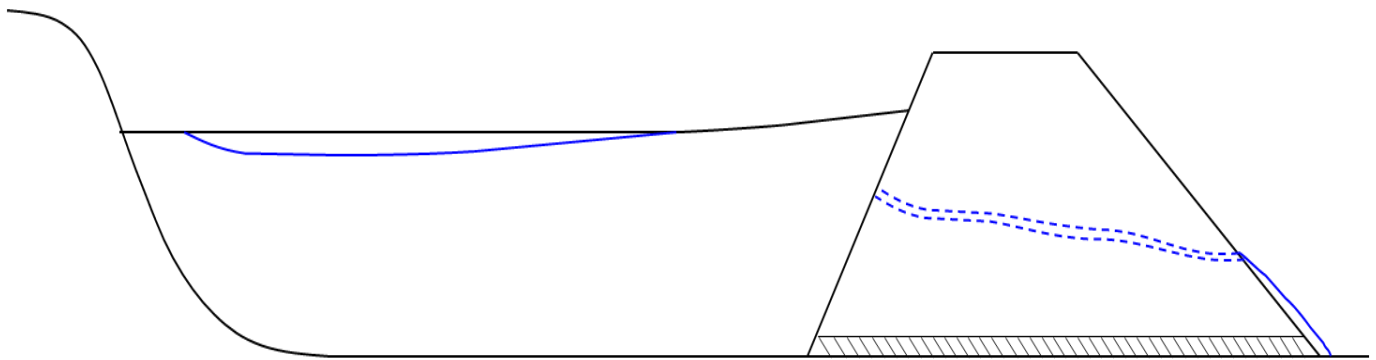
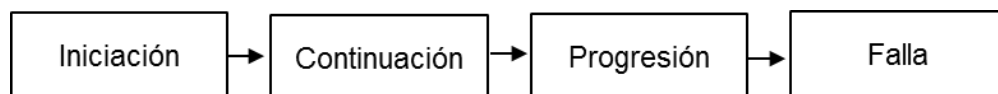


Figura 4.2. Esquema de Erosión Interna.

De acuerdo con Fell et al (2003), el proceso de erosión interna puede ser dividido en cuatro fases:



Iniciación: Se forman fugas. Se inicia la erosión a lo largo de las paredes de la grieta.

Continuación: La erosión continúa su expansión. Esta fase está controlada por los filtros y las zonas de transición: Si éstos están diseñados y contruidos para satisfacer los criterios exigidos, la erosión debería detenerse. En caso contrario, la erosión interna continúa.

Progresión: Se amplía la filtración. Esta progresión se ve afectado por tres situaciones: La capacidad del suelo para soportar el techo de “la tubería” formada por la erosión; ampliación del agujero; y si los flujos estarán limitados por el relleno de las grietas debido a filtros de zonas aguas arriba.

Falla: Existen distintos mecanismos de falla: gran ampliación del agujero, asentamiento de la cresta, socavación en la cresta, generando un rebalse del depósito, desintegración del talud aguas abajo e inestabilidad del talud aguas abajo.

Además, de acuerdo con Fell & Fry (2007), existen cuatro tipos de fallas por erosión interna, los cuales se muestran en la Figura 4.3:

Flujo Concentrado: Proceso de erosión interna que puede comenzar en una grieta en el muro de contención, o en la fundación, que a su vez pudo ser generada por asentamientos diferenciales, ciclos de congelamiento y deshielo, o por fractura hidráulica. La concentración de flujo genera erosión sobre las paredes de la fractura, aumentando su tamaño.

Erosión Retrógrada: Implica el desprendimiento de partículas bajo la acción de un flujo en dirección hacia una superficie sin filtro. Como la cara de aguas debajo del muro de contención, o la superficie libre del suelo de fundación. Las partículas sueltas son arrastradas por el flujo de infiltración que se dirige gradualmente hacia la cara de aguas arriba del muro o de la fundación.

Erosión por Contacto: Erosión que ocurre en zonas de contacto entre materiales de diferentes granulometrías. Por lo general, corresponde al movimiento de las partículas finas del contacto, debido a la presencia de flujo.

Sufusión: Tipo de erosión interna que involucra la migración selectiva de las partículas finas de la matriz de partículas gruesas. Las partículas finas se mueven debido al flujo, a través de los vacíos entre las partículas más grandes.

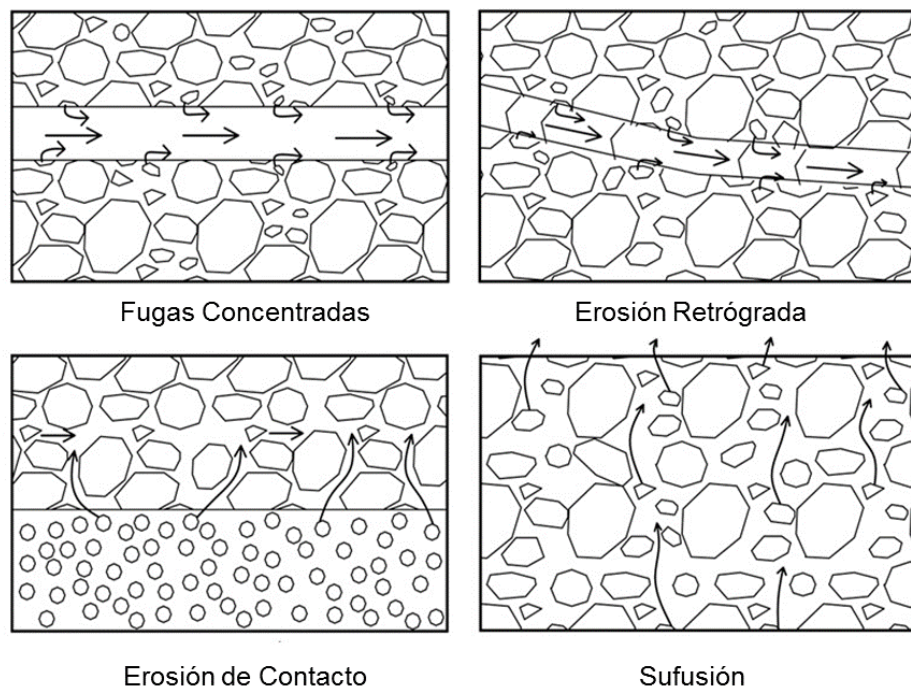


Figura 4.3. Tipos de erosión interna (modificado de Zhang et al., 2016)

Por otra parte, se ha visto (Foster et al, 2000) que las fallas por erosión interna ocurren de manera rápida (entre 6 y 12 horas entre la primera observación de fuga y la falla).

Existen diferentes estudios relacionados con la ocurrencia de erosión interna, en particular, con el tiempo que le toma a este fenómeno desarrollarse y llegar a la falla. Uno de estos estudios fue desarrollado por Fell et al., (2003), en el cual se presenta un método para la estimación aproximada del tiempo en el que progresa la erosión interna.

Fell et al. (2003) estima el tiempo de desarrollo de la erosión interna, considerando:

1. Cada fase del proceso.
2. La evaluación de los tiempos probables para la falla, y los factores que afectan la probabilidad de que se produzca el proceso. Para esto, se asume que la velocidad de ocurrencia de cada fase está correlacionada con la probabilidad de que el proceso ocurra. Así, si la ocurrencia de una fase del proceso es muy probable, es probable también que ésta ocurra rápidamente.
3. El análisis de los casos de estudio de fallas y accidentes, para evaluar si el método del punto anterior es razonable, y para ajustar los tiempos en los casos que sea necesario.

Se ha determinado que el potencial de pérdida de vidas en una falla de depósitos es muy dependiente del tiempo de alerta disponible para evacuar a la población en riesgo aguas debajo de la presa (U.S. Bureau of Reclamation, 1999).

Además, existen diversos factores que influyen en la generación y progresión de este mecanismo de falla. Por ejemplo, mientras mayor sea el contenido de finos (sobre el 15%), mayor es la probabilidad de que se genere erosión interna. Por otro lado, mientras más saturado se encuentre el material, es poco probable que se inicie una falla debido a este mecanismo. La falla en aquellas presas que contaban con algún factor fue más rápida que en aquellas presas sin presencia de factores.

En la mayoría de los casos, no es posible identificar el tiempo de iniciación de la erosión, por lo que la primera señal de erosión suele encontrarse en la fase de Progresión. Por esta razón, según Fell et al. (2003), no es recomendable separar el mecanismo según su etapa de desarrollo, y recomienda la utilización de la siguiente clasificación:

Tabla 4.3. Influencia del material en el desarrollo de fallas por erosión interna (Fuente: Fell et al., 2003)

Descripción del Material	Desarrollo probable de falla
Material de empréstito	Lento – Medio
Suelo con alta plasticidad (LL>50%) y alto contenido de arcilla, incluyendo gravas arcillosas	Medio – Rápido
Suelo con baja plasticidad (LL<35%) y bajo contenido de arcilla, suelos con baja compactación, gravas arenosas limosas	Rápido – Muy Rápido
Arenas, arenas limosas, limos	Muy Rápido

La clasificación mostrada en la Tabla 4.3 está hecha en relación al material en la zona de aguas abajo del muro de contención, y refleja el hecho de que el tiempo de falla está controlado por la capacidad que tiene este material de soportar mayores flujos de filtración. Esto es controlado por qué tan permeable y erosionable sea este material.

4.2.1 Parámetros Críticos e Instrumentación

Para prevenir la erosión interna, el diseño debe enfocarse en generar gradaciones apropiadas entre los materiales que satisfagan los criterios de filtro, controlar la disminución de los gradientes hidráulicos, definir el tamaño de la playa y la posición del nivel freático.

En particular, se definen los siguientes parámetros críticos para este mecanismo de falla:

- Presión de poros al interior del muro y/o en el terreno de fundación.
- Turbiedad del agua en el sistema de drenaje.
- Evidencia de humedad y/o filtraciones en talud de aguas abajo del muro y sector de estribos.
- Cambio de sección del sistema de drenaje.
- Colmatación de drenes.
- Granulometría del material del muro.
- Deformación del suelo de fundación
- Falla en la geomembrana del talud aguas arriba.
- Fenómenos de subsidencia en el muro o en la cubeta cercana al muro.

Respecto a la instrumentación, y de acuerdo con Fell et al., (2003), controlar las infiltraciones, ya sea por inspección visual o mediante instrumentación, es la forma más común de identificar erosión interna. El sistema que se utilice para analizar las filtraciones debe ser capaz de ser calibrado para separar los efectos de la lluvia o del derretimiento de nieve. Sin embargo, se debe reconocer que existen varias situaciones donde no se podrán detectar las infiltraciones.

La frecuencia a la cual se deben controlar las filtraciones depende de qué tan probable es que la presa falle o experimente accidentes por erosión interna. Además, depende de las consecuencias de la falla, y del tiempo que tarda en desarrollarse la erosión interna hasta llegar a la falla (Fell et al., 2003)

4.2.2 Eventos Gatilladores

- Aumento del gradiente hidráulico en el depósito (N, O)
- Aumento del gradiente hidráulico en el suelo de fundación (N, O)
- Asentamientos diferenciales (N, O)
- Variación del nivel freático (N, O)
- Colapso u obstrucción (parcial o completa) del sistema de drenaje (N, O)

Los aumentos de gradiente hidráulico pueden deberse a cambios en el material (particularmente en su granulometría), o a lluvias mayores a las consideradas en el diseño.

4.3 Rebalse

Este mecanismo de falla se produce cuando el volumen de entrada al depósito ya sea de relaves o de agua, excede la capacidad del embalse. La Figura 4.4 muestra un esquema general de este mecanismo de falla.

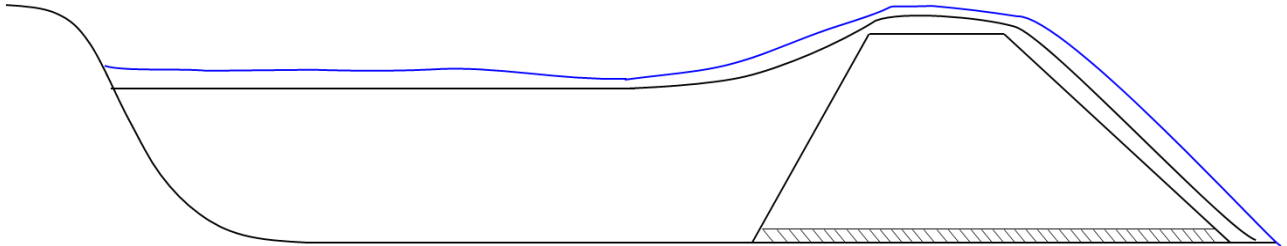


Figura 4.4. Esquema general de un Rebalse.

El rebalse puede generar una erosión considerable en el muro de contención, produciendo una falla progresiva, la cual puede terminar en la formación de una brecha y el posterior colapso.

4.3.1 Parámetros Críticos e Instrumentación

Las características del depósito juegan un rol fundamental en el desarrollo de este mecanismo de falla. En el diseño, la definición de la altura del muro, la revancha, la distancia entre el muro y la laguna de aguas claras (dimensiones de la playa del depósito), el área y volumen de agua en el depósito, son parámetros que deben ser controlados para evitar una falla por rebalse.

Además de las características ya mencionadas, se tienen los siguientes parámetros críticos:

- Deformación del coronamiento.
- Caudales de ingreso y salida.
- Aceleraciones sísmicas en el muro.
- Pendiente de la playa.
- Bloqueo de sección de paso del vertedero.
- Presencia de grietas en el coronamiento

Respecto a los instrumentos, la Tabla 4.4, muestra aquellos que se utilizan con mayor frecuencia para monitorear los parámetros críticos asociados a este mecanismo de falla.

Tabla 4.4. Instrumentos utilizados para controlar los parámetros críticos del Rebalse.

Parámetros Críticos	Instrumento
Altura	Topografía
Revancha	Topografía
Distancia muro – laguna	Topografía
Deformación del coronamiento	Celdas de asentamiento
Caudales de ingreso y salida	Cudalímetro Flujómetro
Aceleraciones sísmicas en el muro	Acelerógrafos
Pendiente de la playa	Fotografía
Bloqueo de sección de paso del vertedero	Inspección visual
Presencia de grietas en el coronamiento	Fotografía

4.3.2 Eventos Gatilladores

De forma análoga a los mecanismos de falla anteriores, se definen eventos gatilladores que, en caso de presentarse, podrían generar una falla en el depósito de relaves. En este caso, (D) significa que puede darse en etapa de diseño.

- Lluvia, crecidas o viento (N)
- Deslizamiento hacia el interior del depósito (N)
- Sismos (N)
- Falla del vertedero de emergencia (O)
- Falla del sistema de recuperación de aguas claras (O)
- Falla de los canales perimetrales (D, O)

Para el caso de fallas en los sistemas de recuperación de agua, vertederos y canales, éstas pueden darse por exceso de flujo entrante principalmente,

4.4 Análisis de Fallas por Estabilidad Física

El CSP² (siglas del inglés *Center for Science in Public Participation*) es una institución estadounidense que entrega capacitación y asesoramiento técnico a distintos grupos sobre la contaminación del agua y los problemas de los recursos naturales, especialmente los relacionados con la minería.

Dentro de las actividades que realiza este Centro, se tiene la constante actualización de un catastro de fallas a nivel mundial, separándolas en cinco categorías según la gravedad de sus consecuencias:

1: Falla Muy Seria: Genera al menos una de las siguientes consecuencias:

- Múltiples pérdidas de vida (~20)
- Descarga de relaves mayor a un millón de metros cúbicos.
- La descarga se desplaza más de 20 kilómetros.

2: Falla Seria: Genera al menos una de las siguientes consecuencias

- Pérdidas de vida
- Descarga de relaves mayor a cien mil metros cúbicos.

3: Otras Fallas de Depósitos de Relaves: Considera que la falla genera consecuencias distintas a las mencionadas en los tipos 1 y 2.

4: Accidente relacionado con Depósito de Relaves: Considera aquellos accidentes que no se incluyan en las categorías 1, 2 y 3.

5: Falla no relacionadas con Relave: Entre los años 1915 y 2016, se han registrado 291 fallas en depósitos de relaves, de las cuales 91 (correspondiente al 31%) corresponden a fallas de tipo 1 y 2 (43 de tipo 1 y 48 de tipo 2)

En relación con las fallas de tipo 1 y 2, se hizo una revisión respecto al nivel de información que existe de aquellas ocurridas entre 1975 y 2016. Así, se hizo la siguiente clasificación según nivel de información:

- Categoría I → Existen reportes, artículos, noticias, etc., respecto a la falla. Se conoce exactamente el mecanismo de falla.
- Categoría II → Existe información suficiente para estimar un posible mecanismo de falla.
- Categoría III → La información **no** es suficiente para estimar un posible mecanismo de falla.

La Tabla 4.5 muestra la clasificación por nivel de información realizada para las fallas ocurridas en las fechas ya mencionadas. Se puede observar que el 55% de las fallas son de categoría III, lo que significa que no tienen la información suficiente para estimar un mecanismo de falla factible. Por otro lado, sólo el 14% de las fallas documentadas permite conocer con mayor grado de exactitud el mecanismo de falla.

Tabla 4.5. Clasificación de Fallas tipo 1 y 2, según su nivel de información.

Categoría	Tipo de Falla según CSP ²	
	Tipo 1	Tipo 2
I	7	3
II	9	13
III	14	25

De las fallas mejor documentadas, se tienen las siguientes relacionadas con los tres mecanismos de falla analizados en este trabajo:

Philex, Filipinas:

Falla ocurrida el año 2012, controlada por Rebalse. Fuertes e incesantes lluvias causaron la falla. Estas lluvias generaron el desplazamiento de las paredes encargadas de redirigir el exceso de agua hacia el sistema de drenaje basal del depósito.

Baia-Mare, Rumania:

Falla ocurrida el año 2000, controlada por Rebalse e Inestabilidad estructural. Fuertes lluvias y caídas de nieve, sumado a un rápido deshielo, elevaron los niveles de agua a valores críticos, generando que la presa se desbordara, lavando un tramo del muro, en el cual se generó una inestabilidad y la posterior falla.

Fundao, Brasil:

Falla ocurrida el año 2015, controlada por Inestabilidad Estructural. Una serie de incidentes generaron la falla de este depósito. El primero de ellos ocurrió el año 2009, donde un error en la construcción del dren basal generó un daño en la presa, de manera que no se pudo seguir con el diseño original del depósito. Por otro lado, se permitió el uso de una saturación mayor, introduciendo el problema de la licuefacción de arenas.

En 2011, no se cumplió con el ancho de la playa, reduciéndola de 200 a 60 metros de ancho. (distancia entre el muro y la laguna)

En 2012, se concluyó que un conducto de hormigón bajo el pilar izquierdo de la presa era estructuralmente deficiente, por lo que no podría soportar cargas adicionales, por lo que la presa no podría seguir creciendo sin solucionar este problema.

En 2013, comienza a aparecer el nivel freático en el muro.

Finalmente, 90 minutos antes de la falla, ocurrieron 3 sismos pequeños. Si bien corresponden a movimientos pequeños, es probable que el movimiento adicional haya acelerado el proceso de falla que ya estaba bastante avanzado.

TVA Kingston, Estados Unidos:

Falla ocurrida el año 2008. Esta falla no tiene evidencia visual documentada, pero se asocia a diversos factores que contribuyeron. Los muros se construyeron bajo el material húmedo con alto índice de vacíos, y una capa de limo que causó la inestabilidad de los muros. Al hacer crecer el muro, se aumentó la carga sobre la ceniza húmeda de las capas.

Si se hubiesen realizado las acciones correctivas recomendadas en las inspecciones regulares, se podría haber evitado el derrame de la planta.

Kolontar, Hungría:

Falla ocurrida el año 2010, controlada por una Erosión interna. Falla asociada a negligencia humana, donde se ignoraron señales, se hicieron graves omisiones y hubo problemas de responsabilidades. La serie de causas que generaron esta falla se enlistan a continuación:

- Deficiencias en monitoreo del daño medioambiental
- Tecnología de disposición desactualizada
- Clasificación incorrecta del material (no catalogado como material peligroso)
- Malas prácticas administrativas respecto a licencias y monitoreo.
- El hundimiento de la presa

Mount Polley, Canadá:

Falla ocurrida el año 2014, controlada por una inestabilidad de taludes. La ocurrencia de esta falla se debe a la suma de diversas causas:

1. Mala caracterización de suelo de fundación
2. Contrafuerte no construido
3. Cambios en la geometría del depósito
4. Exceso de agua en el depósito

De estas fallas, la ocurrida en Mount Polley fue analizada mediante un árbol de falla, el cual se explica a continuación.

4.4.1 Mount Polley, Canadá

Falla catastrófica ocurrida el 4 de agosto del año 2014, donde el muro perimetral del depósito de relaves de Mount Polley, ubicado en la zona centro-sur de British Columbia, Canadá, perdió estabilidad. De acuerdo con Chambers (2015), la pérdida de contención fue repentina, sin ningún tipo de advertencia, que por suerte no cobró ningún daño ni muerte de personas, debido a que no había nadie en o bajo la presa cuando ésta falló. La falla liberó al menos 21 millones de metros cúbicos de relaves y agua sobre el lago Polley, por lo que se declaró un estado local de emergencia en varias comunidades cercanas (Chief Inspector of Mines, 2015).

Posterior a lo ocurrido, un panel de expertos conformado por Norbert Morgenstern, Steven Vick y Dirk Van Zyl, analizó la falla, el cual determinó que el principal error estaba en el diseño, agregando que éste “no contempló la complejidad del entorno geológico sub glacial y pre-glacial asociado a la fundación del terraplén perimetral” (Chambers, 2015). En esta investigación se identificó una capa de suelo glaciolacustre en las cercanías de la falla, en la cual no fue posible reconocer si era o no susceptible a una falla no drenada bajo las tensiones del depósito. Así, el aumento de la carga debido a la construcción del muro y el peso de relaves y agua detrás de muro, hicieron que finalmente la capa de arcilla glacial fallara y deslizará, rompiendo la presa.

Dentro de la investigación, se comparó la ubicación de los puntos donde se realizaron estudios en terreno previo a la construcción del muro, con la zona de falla, donde se pudo observar que en esa zona sólo se habían hecho perforaciones superficiales, sin interceptar con la capa de suelo glaciolacustre. Posterior a la falla, se hicieron perforaciones que sí interceptaron la capa glacial. Se tomaron muestras y se hicieron ensayos de laboratorio, los que claramente mostraron que la capa de arcilla fallaría bajo el aumento de presiones del muro y el relave. Sin embargo, los factores que contribuyeron y aumentaron el impacto de la falla, fueron más complejos que la incapacidad de detectar la capa glacio-lacustre.

El panel de expertos concluyó que la seguridad de un depósito depende de múltiples niveles de protección, ya que, si bien la falla de Mount Polley se debió a una debilidad no detectada en su suelo de fundación, ésta podría haber fallado por rebalse o por erosión interna, de las cuales se descubrieron algunas evidencias.

Por otro lado, la autoridad encargada de estudiar estos accidentes y catástrofes en el país corresponde al Inspector en Jefe de Minas (en inglés, Chief Inspector of Mines), entidad perteneciente al Ministerio de Energía y Minería de British Columbia. Del estudio realizado en esta falla, se obtiene como resultado un Árbol de Falla, el cual presenta la raíz y las causas que contribuyeron al desarrollo de la falla.

La falla puede ser estudiada mediante un *Root Cause Analysis* (RCA). Este método de evaluación identifica las causas raíces de un evento no deseado, y las acciones adecuadas para prevenir su ocurrencia. Determina qué ocurrió, cómo ocurrió y por qué ocurrió. Mediante este análisis, se busca identificar la ausencia o deficiencia en revisiones que podrían haber previsto o mitigado el resultado no deseado. Además, permite al analista generar recomendaciones específicas que pueden prevenir una repetición del resultado no deseado.

El resultado de este análisis se denomina *Event and Causal Factor Tree* (ECFT), el cual muestra gráficamente múltiples cadenas de causalidad vistas en retrospectiva, desde el resultado no deseado hasta la causa raíz. En este caso, los componentes del árbol que define la falla de Mount Polley son los siguientes:

Resultado No Deseado: Resultado distinto al esperado. Suele ocurrir debido a una serie de eventos, los cuales deben ser evaluados para identificar la causa y así generar una solución para prevenir su ocurrencia.

Causa Raíz: Factor que contribuye a la obtención de un resultado no deseado. Si se elimina una causa raíz, el resultado no deseado puede ser prevenido. Múltiples causas raíces generan un resultado no deseado.

Causa: Puede ser un evento o una condición, la que debe haber ocurrido previo o de forma simultánea al resultado no deseado. Debe ser necesaria y suficiente para que se produzca el resultado.

Causa Directa: Uno o más eventos que llevan directamente a la ocurrencia del resultado no deseado. La eliminación de una causa directa puede evitar la ocurrencia del resultado.

La Figura 4.5 muestra el esquema general que siguen los elementos en el árbol de falla de Mount Polley, mientras que la Figura 4.6 presenta el resultado del análisis post-falla. Cada rama de este árbol representa una serie de eventos que terminaron en una Causa Directa. La explicación de cada rama se presenta en Anexos, sin embargo, se concluye que la falla de este depósito de relaves no fue ocasionada por un solo evento o mecanismo de falla, sino que la combinación de varios, sumado a una falta de monitoreo y control de las obras que se estaban llevando a cabo en el depósito, fueron las responsables de que el Tranque de Relaves de Mount Polley fallara de forma tan catastrófica.



Figura 4.5. Esquema general del árbol de falla (Adaptado de Chief Inspector of Mines, 2015).

Este caso constituye un claro ejemplo de la importancia que tiene el control, monitoreo e instrumentación posterior al diseño de la obra de contención.

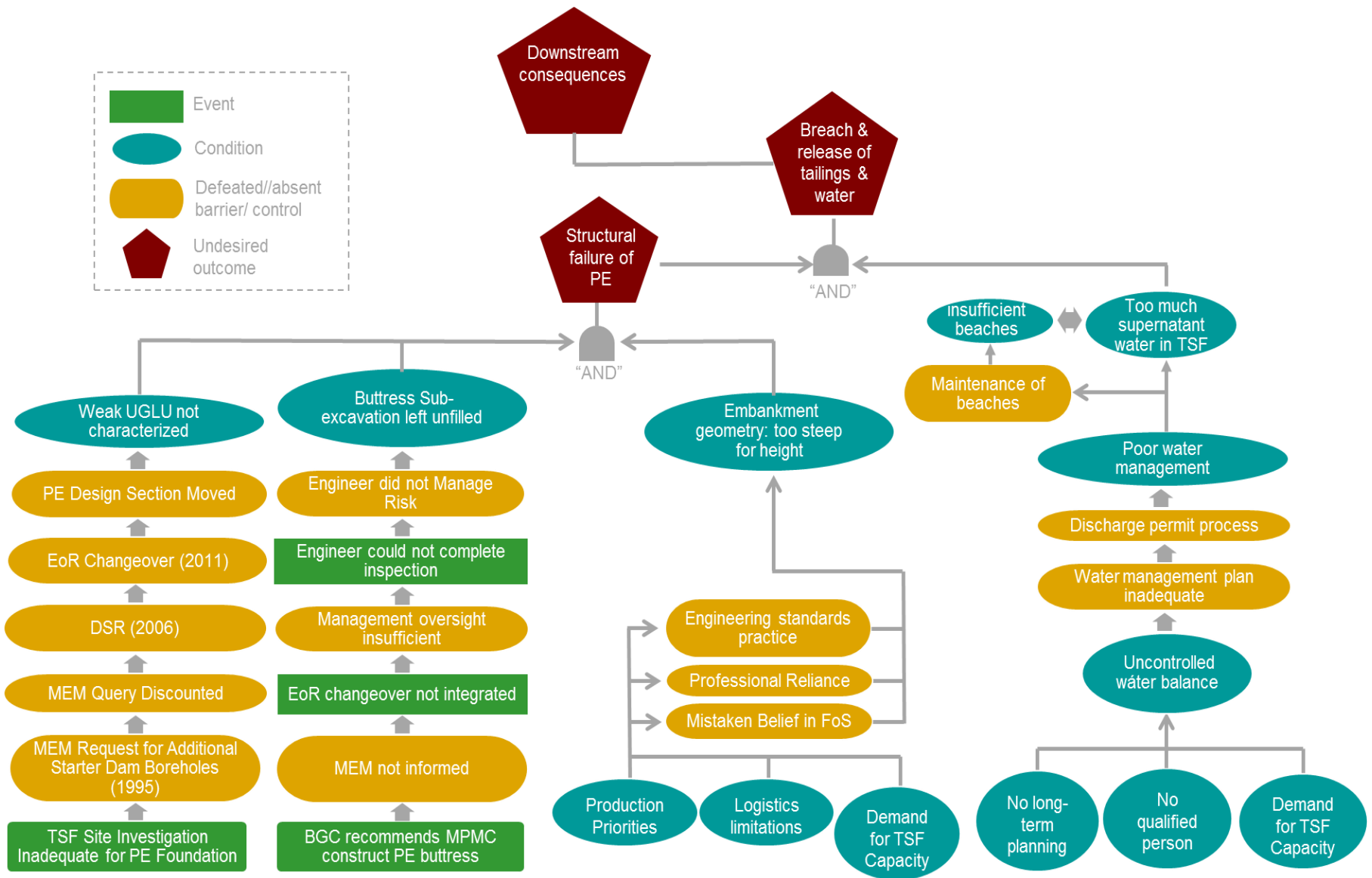


Figura 4.6. Árbol de Falla de Mount Polley (Adaptado de Chief Inspector of Mines, 2015)

5 Metodología de Evaluación de Estabilidad Física

En función de los datos e información revisados, se define una metodología dividida en tres módulos, la cual debe ser aplicada a cada mecanismo de falla. La analogía detrás de esta metodología, mostrada en la Figura 5.1, se explica a continuación:

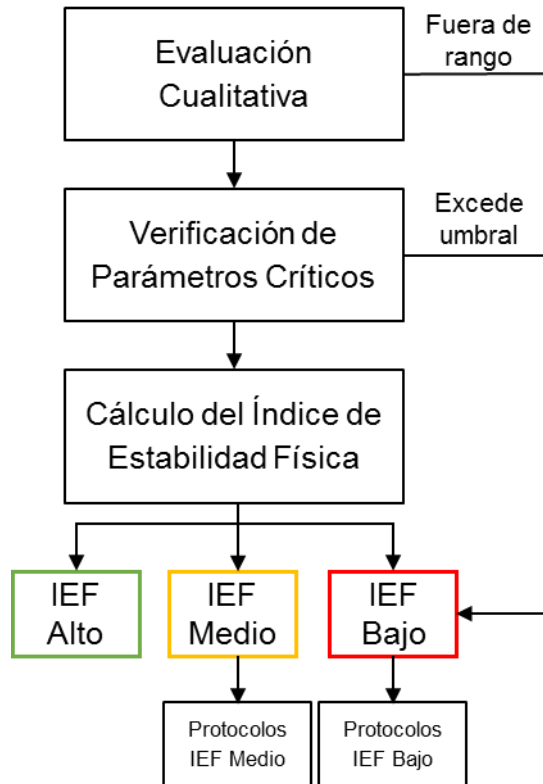


Figura 5.1. Esquema para determinar el Índice de Estabilidad Física.

Así, siguiendo el esquema de la Figura 5.1, primero se evalúan distintas características tanto del depósito en evaluación como de su entorno, con el fin de determinar su nivel de riesgo potencial y determinar si su evaluación cualitativa está dentro o fuera de rango. Si se considera que el depósito está fuera de rango, se asigna un Índice de Estabilidad Física Bajo y se activa el protocolo que permite revertir la situación de riesgo. En caso contrario, si se observa que la evaluación está dentro del rango, se pasa al análisis de parámetros críticos. En este segundo módulo, se definen valores umbrales para cada parámetro crítico. Si alguno de estos parámetros excede el umbral definido, se le asigna al depósito un Índice de Estabilidad Física Bajo y se realiza el protocolo respectivo. Si los parámetros críticos se encuentran dentro de los valores umbrales, se pasa al tercer y último módulo, que corresponde al cálculo del índice de estabilidad física del depósito de relaves para el mecanismo de falla en estudio. Este cálculo se realiza a través de un árbol de falla definido para cada mecanismo de falla. Una vez obtenidos los IEF para cada mecanismo, se combinan de tal manera que el resultado refleje el estado en el cual se encuentra la condición de estabilidad del depósito. A modo de resumen, la Figura 5.2 muestra el método de evaluación de cada módulo.

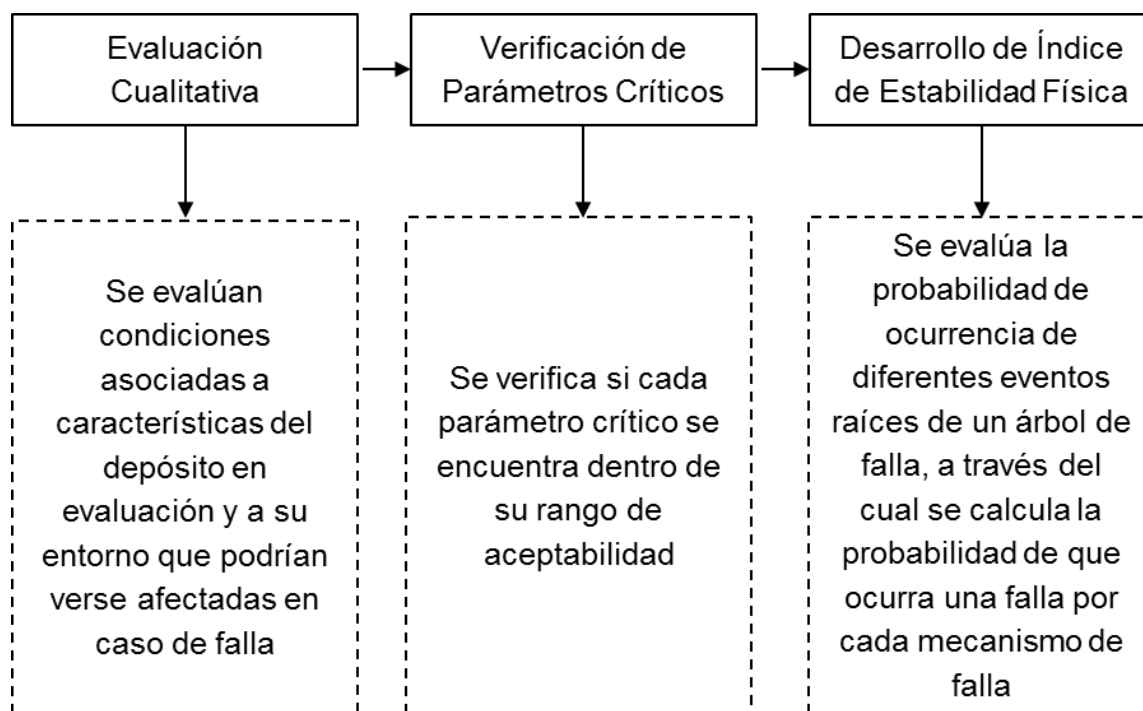


Figura 5.2. Esquema general de la evaluación de cada módulo del IEF.

En relación con la determinación del IEF como tal, cabe destacar que cada una de los módulos de la metodología es más compleja que la anterior. De esta forma, la Evaluación Cualitativa considera un análisis más simple que la Verificación de Parámetros Críticos, el cual, a su vez, tiene menor complejidad que el Cálculo del Índice de Estabilidad Física.

Es importante destacar también que la formulación del Índice de Estabilidad Física nace en base a la revisión antes presentada, por lo que considera las medidas de monitoreo que se toman en la mayoría de los depósitos en la actualidad. De esta forma, el IEF nunca es menos exigente que lo que se hace actualmente.

5.1 Evaluación Cualitativa

Corresponde al módulo inicial de la determinación del Índice de Estabilidad Física. Se basa en la definición de características y propiedades de evaluación directa. Este módulo se divide en tres etapas, mostradas en la Figura 5.3. Es importante mencionar que la definición de este módulo se basó principalmente en normativa nacional (DS248 y D50) y documentos de carácter internacional, principalmente de ICOLD y CDA.

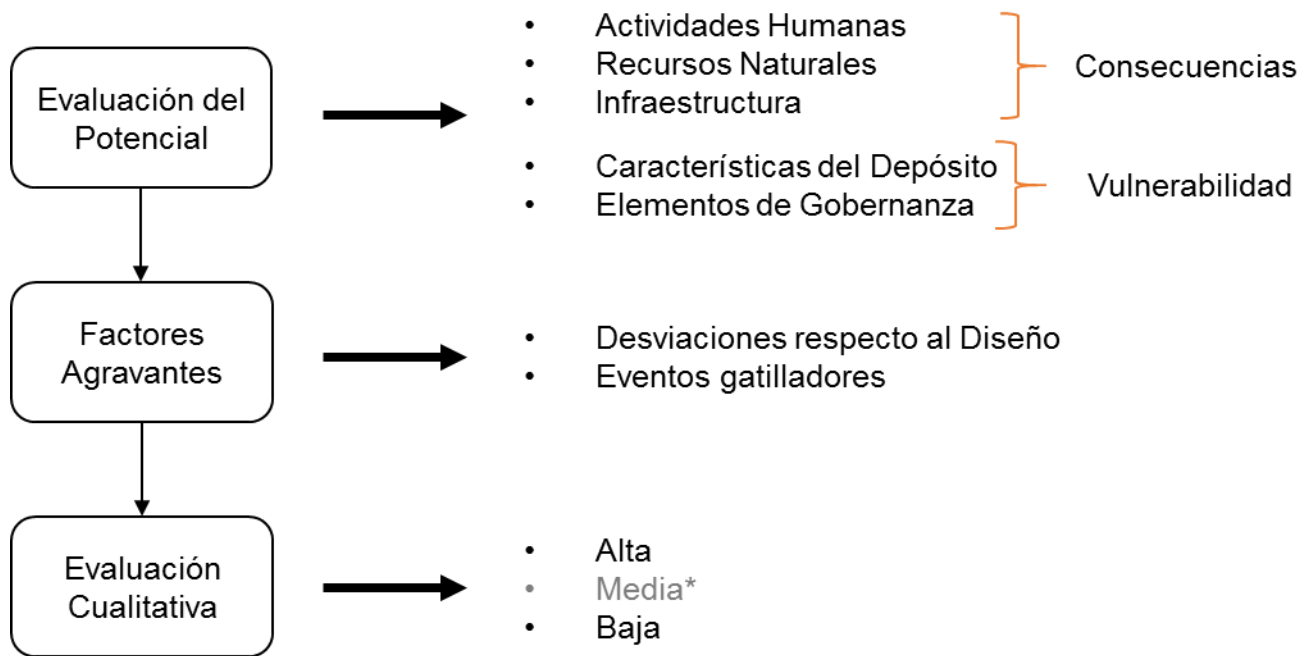


Figura 5.3. Metodología de Evaluación Cualitativa.

5.1.1 Evaluación del Potencial

En esta etapa se evalúa el potencial de vulnerabilidad que tiene el depósito, y las consecuencias que podría tener una falla. Las características a considerar pertenecen a las siguientes categorías:

- Actividades Humanas (AH)
- Recursos Naturales (RN)
- Infraestructura (I)
- Características del depósito (CD)

Además, en este último punto se considera la presencia de elementos de gobernanza.

Cada categoría evalúa diferentes condiciones, asignándole un puntaje según su estado. Luego, cada categoría obtiene un puntaje total, el cual es utilizado posteriormente para evaluar el potencial. A continuación, se presentan las condiciones de cada categoría:

Actividades Humanas (AH):

Se evalúan las condiciones presentes en la Tabla 5.1. Cada condición se verifica en relación a su ubicación con respecto a la distancia peligrosa, que se calcula de acuerdo a lo exigido por el DS248. Si la condición se encuentra dentro de la distancia peligrosa, se asigna una puntuación máxima de 10, mientras que, si se encuentra fuera de esta distancia, se le asigna el puntaje mínimo, que corresponde a 0. Se considera que las cinco condiciones mencionadas en la Tabla 5.1 representan las actividades humanas que se pueden dar aguas debajo de un depósito de relaves ubicado en cualquier parte del país, independiente de la época del año.

Tabla 5.1. Evaluación de condiciones relacionadas con actividades humanas (AH).

Condición a Evaluar	Evaluación/ Puntaje			
	Dentro de la distancia peligrosa	10	Fuera de la distancia peligrosa	0
Zonas turísticas	Dentro de la distancia peligrosa	10	Fuera de la distancia peligrosa	0
Poblaciones	Dentro de la distancia peligrosa	10	Fuera de la distancia peligrosa	0
Actividades agrícolas	Dentro de la distancia peligrosa	10	Fuera de la distancia peligrosa	0
Actividades ganaderas	Dentro de la distancia peligrosa	10	Fuera de la distancia peligrosa	0
Zonas arqueológicas o patrimonio nacional	Dentro de la distancia peligrosa	10	Fuera de la distancia peligrosa	0

Recursos Naturales (RN):

De manera análoga, se definen condiciones relacionadas a recursos naturales, las cuales se evalúan en función de su ubicación respecto a la distancia peligrosa, asignándole puntaje. La Tabla 5.2 muestra las condiciones a evaluar.

Tabla 5.2. Evaluación de condiciones relacionadas con recursos naturales.

Condición a Evaluar	Evaluación/ Puntaje			
	Dentro de la distancia peligrosa	10	Fuera de la distancia peligrosa	0
Cursos de agua superficiales	Dentro de la distancia peligrosa	10	Fuera de la distancia peligrosa	0
Vegetación	Dentro de la distancia peligrosa	10	Fuera de la distancia peligrosa	0
Ecosistemas	Dentro de la distancia peligrosa	10	Fuera de la distancia peligrosa	0

Infraestructura (I):

La Tabla 5.3 presenta las condiciones asociadas a infraestructura presentes en las cercanías del depósito de relaves. Los puntajes asignados corresponden a los mismos que en las categorías anteriores (puntaje máximo igual a 10 cuando se encuentra dentro de la distancia peligrosa, e igual al mínimo de cero cuando está fuera).

Tabla 5.3. Evaluación de condiciones relacionadas con infraestructura (I).

Condición a Evaluar	Evaluación/ Puntaje			
	Dentro de la distancia peligrosa	10	Fuera de la distancia peligrosa	0
Puentes	Dentro de la distancia peligrosa	10	Fuera de la distancia peligrosa	0
Plantas de Agua Potable Rural (APR)	Dentro de la distancia peligrosa	10	Fuera de la distancia peligrosa	0
Infraestructura crítica en general	Dentro de la distancia peligrosa	10	Fuera de la distancia peligrosa	0

Características del Depósito (CD):

Por último, se deben evaluar las condiciones presentadas en la Tabla 5.4, donde la distribución de puntajes en algunas condiciones es distinta a las anteriores. Estas condiciones y su puntuación se explican a continuación:

- Situación operacional actual:

Los depósitos de relave en operación reciben el menor de los puntajes pues, dadas sus condiciones, están bajo revisión de manera más seguida y, en caso de presentarse una emergencia, cuentan con planes de acción y trabajadores en faena para actuar de manera oportuna. Mientras que, para los depósitos en estado de abandono, los cuales no tienen dueño conocido, no existen planes de emergencia o trabajadores que puedan dar aviso en caso de falla, por lo que se les asigna el mayor de los puntajes. A los depósitos en cierre se le asigna un puntaje intermedio dada que su situación es levemente más desfavorable que la condición de un depósito en operación.

- Tipo de relave:

El relave puede pasar por distintos procesos para disminuir la cantidad de agua y tener una depositación más segura. Así, los relaves filtrados son aquellos cuya cantidad de agua es menor, por lo que se les asigna un puntaje igual a cero. Luego, siguen los relaves en pasta y los espesados, para llegar al relave convencional, cuyo contenido de agua es mayor por lo que se le asigna el puntaje más alto, igual a 10.

- Método constructivo:

Se entiende que la construcción del muro de contención de un tranque de relaves se puede hacer de tres maneras, siendo la construcción aguas abajo más segura que la de eje central, y ésta es mejor que la construcción aguas arriba. Si bien en Chile está prohibido utilizar el método de construcción aguas arriba, aún existen tranques cuyos muros se construyeron de esta forma, a los cuales se les debe asignar un puntaje mayor que a un muro construido con los otros métodos.

Además, cuando se habla de elementos de gobernanza, se hace referencia a aquellos que ayudan a mantener los estándares de construcción y operación del depósito de relaves. Ejemplos de éstos son un ingeniero de registros (EoR), un panel de revisores, contar con planos *as-built*, entre otros.

Tabla 5.4. Evaluación de condiciones relacionadas con las características del depósito.

Condición a Evaluar	Evaluación/Puntaje							
	Situación operacional actual	Abandonado	10	En Operación	5	Cierre	0	
Tipo de relave	Convencional	10	Espesado	7	En Pasta	4	Filtrado	0
Método constructivo	Aguas arriba	10	Eje Central	5	Aguas abajo	0		
Elementos de gobernanza	Sí	0	No	10				
Instrumentación operativa	Sí	0	No	10				
Exposición a crecidas de ríos	Sí	10	No	0				
Exposición a acumulación de escorrentías	Sí	10	No	0				
Exposición a avalanchas y/o aluviones	Sí	10	No	0				

Una vez finalizada esta evaluación, se obtiene un puntaje para cada categoría, correspondiente a la sumatoria de puntajes de cada condición. Con esto, es posible clasificar el potencial de riesgo de acuerdo con la Tabla 5.5

Tabla 5.5. Potencial de Riesgo.

Potencial de Riesgo	Actividades Humanas (AH)	Recursos Naturales (RN)	Infraestructura (I)	Características del Depósito (CD)
Alto	$\sum AH > 30$	$\sum RN > 20$	$\sum I > 20$	$\sum CD > 50$
Regular	$10 < \sum AH \leq 30$	$10 < \sum RN \leq 20$	$10 < \sum I \leq 20$	$20 < \sum CD \leq 50$
Bajo	$\sum AH \leq 10$	$\sum RN \leq 10$	$\sum I \leq 10$	$\sum CD \leq 20$

5.1.2 Factores Agravantes

Una vez determinado el Potencial de Riesgo del depósito de relaves, se pasa a la segunda etapa, cuyo objetivo es determinar si existen factores que puedan comprometer la condición de estabilidad física del depósito en estudio. Así, se realiza una evaluación donde se controla el cumplimiento de las condiciones de diseño y se verifica la ocurrencia de eventos gatilladores de los mecanismos de falla.

Como condiciones de diseño, se consideran aquellos parámetros geométricos y constructivos que se definieron en la etapa de diseño del depósito (Tabla 5.6). Por ejemplo, si la altura del depósito difiere de la establecida en la resolución de diseño entregada al SERNAGEOMIN, se considera como una desviación respecto al diseño, por lo que se le asigna una respuesta afirmativa.

Con respecto a los eventos gatilladores, se consideran eventos que pueden afectar la estabilidad física de un depósito de relaves. Cada condición a evaluar puede afectar a uno o más mecanismos de falla. La Tabla 5.7 muestra los eventos gatilladores asociados a inestabilidad de taludes (IT), rebalse (R) y erosión interna (EI).

Tanto de la evaluación de desviaciones respecto al diseño como de eventos gatilladores, se obtiene un total de “Sí” y uno de “No”.

Tabla 5.6. Evaluación de condiciones relacionadas con desviación respecto al diseño.

Condición a Evaluar	¿Desviación respecto al diseño?	
Altura [m]	Sí	No
Revancha	Sí	No
Ancho de coronamiento	Sí	No
Superficie del depósito	Sí	No
Posición y tamaño de la laguna	Sí	No
Inclinación talud aguas abajo [°]	Sí	No
Materiales Inapropiados	Sí	No

Tabla 5.7. Evaluación de eventos gatilladores.

Condición a Evaluar	Evaluación	
	Sí	No
Reducción del prisma resistente mediante excavaciones en el pie del muro (IT)	Sí	No
Mayor disposición de relave con respecto al diseño original (IT, R)	Sí	No
Deslizamiento hacia el interior del depósito (R)	Sí	No
Falla o bloqueo del vertedero de emergencia (R)	Sí	No
Falla del sistema de recuperación de aguas claras (R)	Sí	No
Falla o bloque de los canales perimetrales (R)	Sí	No
Filtraciones o piping observadas (EI)	Sí	No
Asentamientos diferenciales (EI)	Sí	No
Falla en el sistema de drenaje (EI)	Sí	No

5.1.3 Evaluación Cualitativa

Con los resultados del potencial de cada categoría, es posible limitar la cantidad de factores agravantes admisibles al momento de la evaluación de acuerdo con lo siguiente:

- Si la evaluación de potencial de riesgo tiene una categoría en “Alto”, la cantidad de factores agravantes tolerable se limita a uno.
- Si la evaluación de potencial de riesgo tiene más de una categoría en “Alto”, no se aceptan factores agravantes.
- Si la evaluación de potencial de riesgo tiene una categoría en “Regular”, la cantidad de factores agravantes tolerable se limita a dos.

- Si la evaluación de potencial de riesgo tiene dos categorías en “Regular”, la cantidad de factores agravantes tolerable se limita a uno.
- Si la evaluación de potencial de riesgo tiene más de dos categorías en “Regular”, no se aceptan factores agravantes.
- Si la evaluación de potencial de riesgo tiene todas sus categorías en “Bajo”, la cantidad de factores agravantes tolerable se limita a tres.

Si se está dentro de las combinaciones antes mencionadas, se pasa al segundo módulo, correspondiente a la verificación de parámetros críticos. Si se encuentra fuera de rango, se activan los protocolos correspondientes.

5.2 Análisis de Parámetros Críticos

Corresponde al segundo módulo de la determinación del índice de estabilidad física. En éste, y en base a los documentos revisados y presentados anteriormente, se definen, para cada mecanismo de falla, aquellos parámetros que tiene un gran efecto en la estabilidad de un depósito de relaves.

Los parámetros críticos se miden y calculan a partir de variables monitoreadas tanto en línea como de forma presencial (directo en terreno), para luego ser comparados con valores umbrales, los cuales se definen en base a información disponible, desde normas y guías de buenas prácticas, hasta manuales de emergencia, formularios E-700, resoluciones de aprobación, entre otros.

Si el valor de un parámetro crítico excede el umbral, se le asigna un Índice de Estabilidad Física Bajo y se activa el protocolo correspondiente. Si todos los parámetros críticos se encuentran dentro de los valores umbrales, se pasa al tercer y último módulo de la metodología, correspondiente al cálculo del Índice de Estabilidad Física.

La Tabla 5.8 muestra los parámetros críticos a considerar, junto con el mecanismo de falla al que aplican, los valores y umbrales de aceptabilidad típicos (en caso de tener) y las fuentes de donde es posible obtener dichos valores. De estos parámetros, algunos asociados principalmente al muro de contención, como geometría del muro, ancho del coronamiento, inclinación de taludes, entre otros, se miden generalmente en secciones transversales del muro, mientras que hay otros que se miden de forma general, como la posición de la laguna de aguas claras, o en puntos específicos, como la aceleración sísmica y el caudal de recolección de sistemas de drenaje.

La Tabla 5.8 incluye parámetros que son medidos frecuentemente, debido a que tienen carácter obligatorio, pero también se presentan parámetros que no suelen ser medidos, pero que si se consideran relevantes en la estabilidad física de un depósito de relaves

Tabla 5.8. Parámetros críticos considerados en el análisis.

Parámetros Críticos	Mecanismo de Falla	Rangos/Umbrales de Aceptabilidad	Referencias
Geometría del muro	Inestabilidad de Taludes	Diferencias entre la geometría del depósito y lo presentado en el diseño y plan de crecimiento	Procedimiento de acciones ante emergencias en el tranque de relaves Las Tórtolas. (Anglo American, 2016)
Ancho del coronamiento	Inestabilidad de Taludes Rebalse	5 metros (resolución de aprobación) 1 metro (nivel rojo de alerta) Entre 1 y 2 metros (plan naranja de alerta) Entre 2 y 3 metros (nivel amarillo de alerta) Mayor a 3 metros (nivel verde de alerta)	Resolución de aprobación. Proyecto Depósito de Relaves Planta OP Minning Chile SpA. Procedimiento de acciones ante emergencias en el tranque de relaves Las Tórtolas. (Anglo American, 2016)
Inclinación de taludes	Inestabilidad de Taludes	Depende de los valores de diseño En general, no superior a H:V = 2:1 (salvo presas de enrocado)	Decreto Supremo 248, Artículo 14 o): Análisis de estabilidad de taludes. (Ministerio de Minería de Chile, 2007) Resoluciones de aprobación de proyecto. Engineering and Design Manual, US Department of Labor (Mine Safety and Health Administration MSHA, 2010)
Nivel freático muro y depósito	Inestabilidad de Taludes	Nivel de agua debe ser menor al aceptable por diseño 10 metros (emergencia desarrollo lento) 20 metros (emergencia desarrollo inminente)	Instrumentación Geotécnica Depósito La Brea. Lumina Copper S.A. (Arcadis, 2010) Resoluciones de aprobación de proyecto. Proyecto Depósito de Relaves Planta OP Minning Chile SpA.
Presiones de poros muro y depósito	Inestabilidad de Taludes Erosión Interna	Nivel piezométrico definido en base a análisis de estabilidad y	Decreto Supremo 248 (Ministerio de Minería de Chile, 2007) Manuales de Emergencia

Parámetros Críticos	Mecanismo de Falla	Rangos/Umbrales de Aceptabilidad	Referencias
		filtraciones. Establecer umbral para la tasa de variación	
Aceleraciones sísmicas del muro	Inestabilidad de Taludes Rebalse	Valores distintos a los utilizados en el modelo utilizado en etapa de diseño Percepción de movimiento importante No se puede mantener de pie sin apoyo	Instrumentación Geotécnica Depósito La Brea. Lumina Copper S.A. (Arcadis, 2010) Manual de Emergencia Tranque Mauro (Arcadis, 2014)
Nivel de compactación del muro	Inestabilidad de Taludes Erosión Interna	Menor a 85% Proctor modificado (nivel rojo de alerta) Entre 87% y 85% Proctor modificado (nivel naranja de alerta) Entre 92% y 87% Proctor modificado (nivel amarillo de alerta) Mayor a 92% Proctor modificado (nivel verde)	Procedimiento de acciones ante emergencias en el tranque de relaves Las Tórtolas. (Anglo American, 2016)
Granulometría del material del muro	Inestabilidad de Taludes Erosión Interna	No más de un 20% de partículas menores de malla 200, pero se puede especificar valores más restrictivos de acuerdo con diseño y condiciones de gradación en muros de arena cicloneada 5% o menos de finos en muros de enrocado. Granulometría de los filtros y drenes deben satisfacer criterios de filtro	Decreto Supremo 248 (Ministerio de Minería de Chile, 2007)

Parámetros Críticos	Mecanismo de Falla	Rangos/Umbrales de Aceptabilidad	Referencias
Rigidez y resistencia al corte del muro	Inestabilidad de Taludes	Explícitamente no existe un rango, pero debe ser tal que se cumpla el factor de seguridad usado en el diseño	Resoluciones de aprobación de proyecto
Rigidez y resistencia suelo fundación	Inestabilidad de Taludes	Explícitamente no existe un rango, pero debe ser tal que se cumpla el factor de seguridad usado en el diseño	Resoluciones de aprobación de proyecto
Caudal de recolección de sistemas de drenaje	Inestabilidad de Taludes	Aumento anormal de caudal Aumento de nivel en piezómetros	Procedimiento de acciones ante emergencias en el tranque de relaves Las Tórtolas. (Anglo American, 2016)
Desplazamientos del muro	Inestabilidad de Taludes	Máximo tolerable según diseño	Decreto Supremo 248 (Ministerio de Minería de Chile, 2007)
Deformaciones de estribo	Inestabilidad de Taludes	Máximo tolerable según diseño	Resoluciones de aprobación de proyecto
Tonelaje	Inestabilidad de Taludes	No se exigen valores fijos, pero no debe superarse la capacidad de diseño	Decreto Supremo 248 (Ministerio de Minería de Chile, 2007)
Revancha	Rebalse	2 metros (resolución de aprobación) 5 metros (revancha operacional) 1,5 metros (revancha hidráulica) 3 metros (menor a 1 metro, se activa Alarma, entre 1 y 3 metros, se activa Alerta)	Resolución de aprobación. Proyecto Depósito de Relaves Planta OP Minning Chile SpA. Manual de Emergencia Tranque Mauro (Arcadis, 2014) Procedimiento de acciones ante emergencias en el tranque de relaves Las Tórtolas. (Anglo American, 2016)

Parámetros Críticos	Mecanismo de Falla	Rangos/Umbrales de Aceptabilidad	Referencias
Posición/Área laguna de aguas claras	Inestabilidad de Taludes Rebalse	Lo más alejada del muro posible 200 metros del muro (si está en contacto se activa Alarma, entre 0 y 200 metros, se activa Alerta)	Resolución de aprobación. Proyecto Depósito de Relaves Planta OP Minning Chile SpA. Procedimiento de acciones ante emergencias en el tranque de relaves Las Tórtolas. (Anglo American, 2016)
Deformación del coronamiento	Rebalse	Mayores a los estimados en análisis dinámico Cuando las lecturas en las celdas de asentamiento muestran variaciones con tasas muy diferentes a las precedentes y que no se ajustan a la tasa de crecimiento del muro	Manual de Emergencia Tranque Mauro (Arcadis, 2014) Procedimiento de acciones ante emergencias en el tranque de relaves Las Tórtolas. (Anglo American, 2016)
Caudales (ingreso y salida)	Rebalse	No se exigen valores	No existe normativa que limite este parámetro
Pendiente de playa	Rebalse	No se exigen valores Queda definida por el diseño y el tipo de depósito	No existe normativa que limite este parámetro
Altura de Ola	Rebalse	No se exigen valores	No existe normativa que limite este parámetro
Bloqueo de vertedero	Rebalse	Detección de bloqueo durante inspección Volumen de laguna mayor al máximo de diseño	Manual de Emergencia Tranque Mauro (Arcadis, 2014)
Presencia de grietas en coronamiento	Rebalse	Detección de grietas (si se observan, la condición es crítica)	No existe normativa que limite este parámetro

Parámetros Críticos	Mecanismo de Falla	Rangos/Umbrales de Aceptabilidad	Referencias
Turbiedad del agua en sistema de drenaje	Erosión Interna	Detección de turbiedad (si se observan, la condición es crítica)	Instrumentación Geotécnica Depósito La Brea. Lumina Copper S.A. (Arcadis, 2010)
Evidencia de humedad y/o filtraciones talud aguas abajo	Inestabilidad de Taludes Erosión Interna	Caudal mayor al de diseño Presencia localizada de fuente de agua Afloramiento de agua	Instrumentación Geotécnica Depósito La Brea. Lumina Copper S.A.(Arcadis, 2010) Procedimiento de acciones ante emergencias en el tranque de relaves Las Tórtolas. (Anglo American, 2016)
Cambio de sección sistema de drenaje	Inestabilidad de Taludes Erosión Interna	No se exigen valores	No existe normativa que limite este parámetro
Colmatación de drenes	Inestabilidad de Taludes Erosión Interna	Detección de colmatación (si se observan, la condición es crítica)	No existe normativa que limite este parámetro
Granulometría del material del dren	Erosión Interna	Cumple criterios de filtro y asegura fuertes contraste de conductividad hidráulica entre el muro y el dren.	Resoluciones de Aprobación de Proyecto
Deformación suelo de fundación	Inestabilidad de Taludes Rebalse Erosión Interna	Cuando las lecturas en las celdas de asentamiento muestran variaciones con tasas muy diferentes a las precedentes y que no se ajustan a la tasa de crecimiento del muro	Procedimiento de acciones ante emergencias en el tranque de relaves Las Tórtolas. (Anglo American, 2016)
Subsidencia o socavación en muro o en cubeta, cerca del muro	Rebalse Erosión Interna	Mayores a los estimados en análisis dinámico	Manual de Emergencia Tranque Mauro (Arcadis, 2014)

5.3 Desarrollo de Índice de Estabilidad Física

Corresponde al último módulo en la Determinación del Índice de Estabilidad Física (IEF) de un depósito de relaves, y consiste en el cálculo de un índice para cada mecanismo de falla. El valor final de este índice corresponderá al menor de los 3. Por ejemplo, si para dos de los tres mecanismos de falla se tiene un IEF Alto, pero para el tercero se obtiene un IEF Medio, el Índice de Estabilidad Física del depósito será Medio.

El Índice de Estabilidad Física es una medida de la probabilidad de falla de un depósito de relaves ante un mecanismo de falla. En esta oportunidad, se presenta como solución la utilización de Árboles de Falla, siguiendo la lógica previamente presentada. Así, para cada mecanismo de falla, se define un árbol en función de los parámetros críticos y eventos gatilladores. Cada árbol y sus ramas asociadas se explica en las secciones siguientes. Además, en función de la bibliografía revisada, es posible establecer las probabilidades de ocurrencia de cada evento raíz, la cual se presenta también en las secciones a continuación.

5.3.1 Inestabilidad de Taludes

Para analizar una falla por inestabilidad de taludes, se divide en falla de fundación y falla de talud, ya que los eventos que generan la inestabilidad son distintos en cada caso.

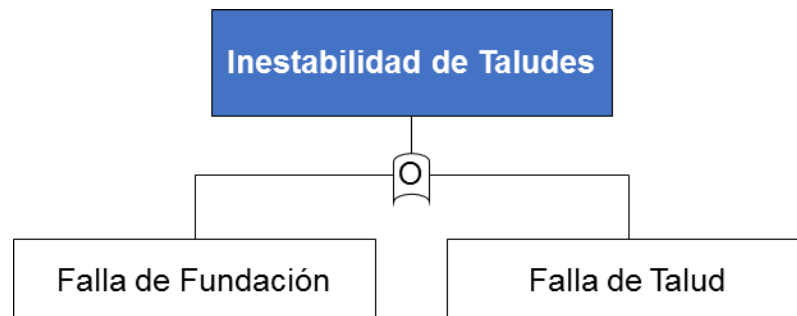


Figura 5.4. Determinación del Índice de Estabilidad para el caso de Inestabilidad de Taludes.

El conector entre ambos análisis de inestabilidad corresponde a un conector O, ya que basta con que uno ocurra para que se desarrolle una inestabilidad de taludes.

Falla de Fundación:

El árbol de falla asociado a este mecanismo se divide en dos principales ramas, correspondientes a falla estática y falla sísmica. La descripción de cada causa raíz utilizada en la definición de este árbol de falla se presenta en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Descripción de Causas Raíces para Inestabilidad de Taludes- falla de fundación.

	Causa Raíz	Descripción
1	Factor de seguridad estático menor al mínimo establecido en el diseño.	Probabilidad de que, a partir de un análisis de equilibrio límite, se obtenga un factor de seguridad menor al mínimo definido. Este valor mínimo puede estar dado por diseño, o puede ser el definido por la normativa (FS=1,2 según DS248). El factor de seguridad depende de distintos factores que se controlan en el muro de contención del depósito. Estos factores son geometría (inclinación y dimensiones), red de flujo, características del material, entre otras.
2	Suelo con potencial mal comportamiento estático	Probabilidad de que el suelo de fundación pueda comportarse de manera distinta a la esperada. Se relaciona, por ejemplo, a la presencia de suelos colapsables y/o planos preferenciales de falla.
3	Excesiva deformación	Probabilidad de que se detecten, mediante instrumentación, deformaciones que excedan a las definidas en la etapa de diseño del depósito. Esta deformación puede darse en cualquier sección del suelo de fundación o de manera global.
4	Formación de grietas	Probabilidad de que se generen grietas en el suelo de fundación, por diversas causas, excluyendo eventos sísmicos.
5	Aumento de presión de poros	Probabilidad de que los sistemas de instrumentación (piezómetros) midan un aumento en los valores de presiones de poros
6	Factor de seguridad sísmico menor al mínimo establecido en el diseño.	Probabilidad de que, a partir de un análisis de equilibrio límite, se obtenga un factor de seguridad menor al mínimo definido. Este valor mínimo puede estar dado por diseño, o puede ser el definido por la normativa El factor de seguridad depende de distintos factores que se controlan en el muro de contención del depósito. Estos factores son geometría (inclinación y dimensiones), red de flujo, características del material, entre otras.
7	Suelo con potencial mal comportamiento sísmico	Probabilidad de que en terreno se encuentren suelos que, al verse enfrentados a un evento sísmico, presenten un mal comportamiento. Corresponde a la presencia de suelos licuables, susceptibles a movilidad cíclica, entre otras.
8	Aumento de presión de poros (por sismo)	Probabilidad de que, posterior a un evento sísmico, los sistemas de instrumentación (piezómetros) midan un aumento en los valores de presiones de poros

9	Amplificación a nivel basal	Probabilidad de que la respuesta del suelo ante un evento sísmico se vea amplificada a nivel de la base del depósito.
10	Excesiva deformación (para falla sísmica)	Probabilidad de que, posterior a un evento sísmico, se detecten, mediante instrumentación, deformaciones que excedan a las definidas en la etapa de diseño del depósito. Esta deformación puede darse en cualquier punto del suelo de fundación, o de manera generalizada.
11	Formación de grietas (para falla sísmica)	Probabilidad de que, posterior a un evento sísmico, se generen grietas en el suelo de fundación.

En términos generales, para que exista falla estática de fundación, se debe tener al menos uno de los siguientes eventos:

- Factor de seguridad estático menor al mínimo establecido en el diseño
- Suelo con potencial mal comportamiento estático
- Evidencia de mal comportamiento

Donde este último se debe a la presencia de excesiva deformación, formación de grietas o a un aumento en la presión de poros.

Por otro lado, para que ocurra una falla sísmica, se debe dar al menos uno de los siguientes eventos:

- Factor de seguridad sísmico menor al mínimo establecido en el diseño.
- Suelo con potencial mal comportamiento sísmico
- Evidencia de mal comportamiento

Donde la evidencia de mal comportamiento se puede dar debido a una excesiva deformación, a la formación de grietas, un aumento de presión de poros o una amplificación a nivel basal. Cualquiera de estas causas raíces debe darse posterior a un evento sísmico.

La Figura 5.5 muestra el esquema para el árbol de falla de Inestabilidad de taludes, para falla de fundación.

Falla de Talud:

De manera análoga al caso de Falla de Fundación, se definen dos ramas, una para falla estática y otra para falla sísmica. La Tabla 5.10 muestra la descripción de las causas raíces utilizadas para definir el árbol de falla de talud.

Tabla 5.10. Descripción de Causas Raíces para Inestabilidad de Taludes – falla de talud.

	Causa Raíz	Descripción
12	Factor de seguridad estático menor al mínimo establecido en el diseño.	Probabilidad que, a partir de un análisis de equilibrio límite, se obtenga un factor de seguridad menor al mínimo definido. Este valor mínimo puede estar dado por diseño, o puede ser el definido por la normativa (igual a 1,2 según DS248). El factor de seguridad depende de distintos factores que se controlan en el muro de contención del depósito. Estos factores son geometría (inclinación y dimensiones), red de flujo, características del material, entre otras.
13	Compactación deficiente	Probabilidad que la compactación efectuada en terreno sea menor a la definida en la etapa de diseño del depósito
14	Excesiva deformación	Probabilidad que se detecten, mediante instrumentación, deformaciones que excedan a las definidas en la etapa de diseño del depósito. Esta deformación puede darse en cualquier punto del suelo de fundación, o de manera generalizada.
15	Formación de grietas	Probabilidad que se generen grietas en el suelo de fundación, por diversas causas, excluyendo eventos sísmicos.
16	Aumento de presión de poros	Probabilidad que los sistemas de instrumentación (piezómetros) midan un aumento en los valores de presiones de poros
17	Efectos 3D en el muro	Probabilidad que se presenten efectos tridimensionales en el muro del depósito. Estos efectos pueden deberse a geometrías especiales, o a cambios en la topografía del lugar.
18	Problemas de borde	Probabilidad que existan problemas de borde en la estructura del muro de contención.
19	Factor de seguridad sísmico menor al mínimo establecido en el diseño.	Probabilidad que, a partir de un análisis de equilibrio límite, se obtenga un factor de seguridad menor al mínimo definido. Este valor mínimo puede estar dado por diseño, o puede ser el definido por la normativa El factor de seguridad depende de distintos factores que se controlan en el muro de contención del depósito. Estos factores son geometría (inclinación y dimensiones), red de flujo, características del material, entre otras.
20	Material con potencial mal comportamiento sísmico	Probabilidad que en terreno se encuentren suelos que, al verse enfrentados a un evento sísmico, presenten un mal comportamiento. Corresponde a

		la presencia de suelos licuables, susceptibles a movilidad cíclica, entre otras.
21	Excesiva deformación (para falla sísmica)	Probabilidad que, posterior a un evento sísmico, se detecten, mediante instrumentación, deformaciones que excedan a las definidas en la etapa de diseño del depósito. Esta deformación puede darse en cualquier punto del suelo de fundación, o de manera generalizada.
22	Formación de grietas (para falla sísmica)	Probabilidad que, posterior a un evento sísmico, se generen grietas en el suelo de fundación.
23	Aumento de presión de poros	Probabilidad que, posterior a un evento sísmico, los sistemas de instrumentación (piezómetros) midan un aumento en los valores de presiones de poros
24	Amplificación en coronamiento	Probabilidad que la respuesta del suelo ante un evento sísmico se vea amplificada a nivel del coronamiento del depósito.

En este caso, para que exista falla estática de talud, se debe tener al menos uno de los siguientes eventos:

- Factor de seguridad estático menor al mínimo establecido en el diseño
- Compactación deficiente
- Evidencia de mal comportamiento
- Efectos locales

Donde un mal comportamiento se puede evidenciar mediante excesiva deformación, formación de grietas o a un aumento en la presión de poros. Por otra parte, se tienen efectos locales si se observan efectos 3D en el muro, o problemas de borde.

Para que ocurra una falla sísmica, se debe dar al menos uno de los siguientes eventos:

- Factor de seguridad sísmico menor al mínimo establecido en el diseño.
- Material con potencial mal comportamiento sísmico
- Evidencia de mal comportamiento

Donde la evidencia de mal comportamiento se puede dar debido a una excesiva deformación, a la formación de grietas, un aumento de presión de poros o una amplificación en coronamiento. Al igual que en falla de fundación, estas causas raíces debe darse posterior a un evento sísmico.

La Figura 5.6 muestra el esquema para el árbol de falla de Inestabilidad de taludes, para falla de fundación.

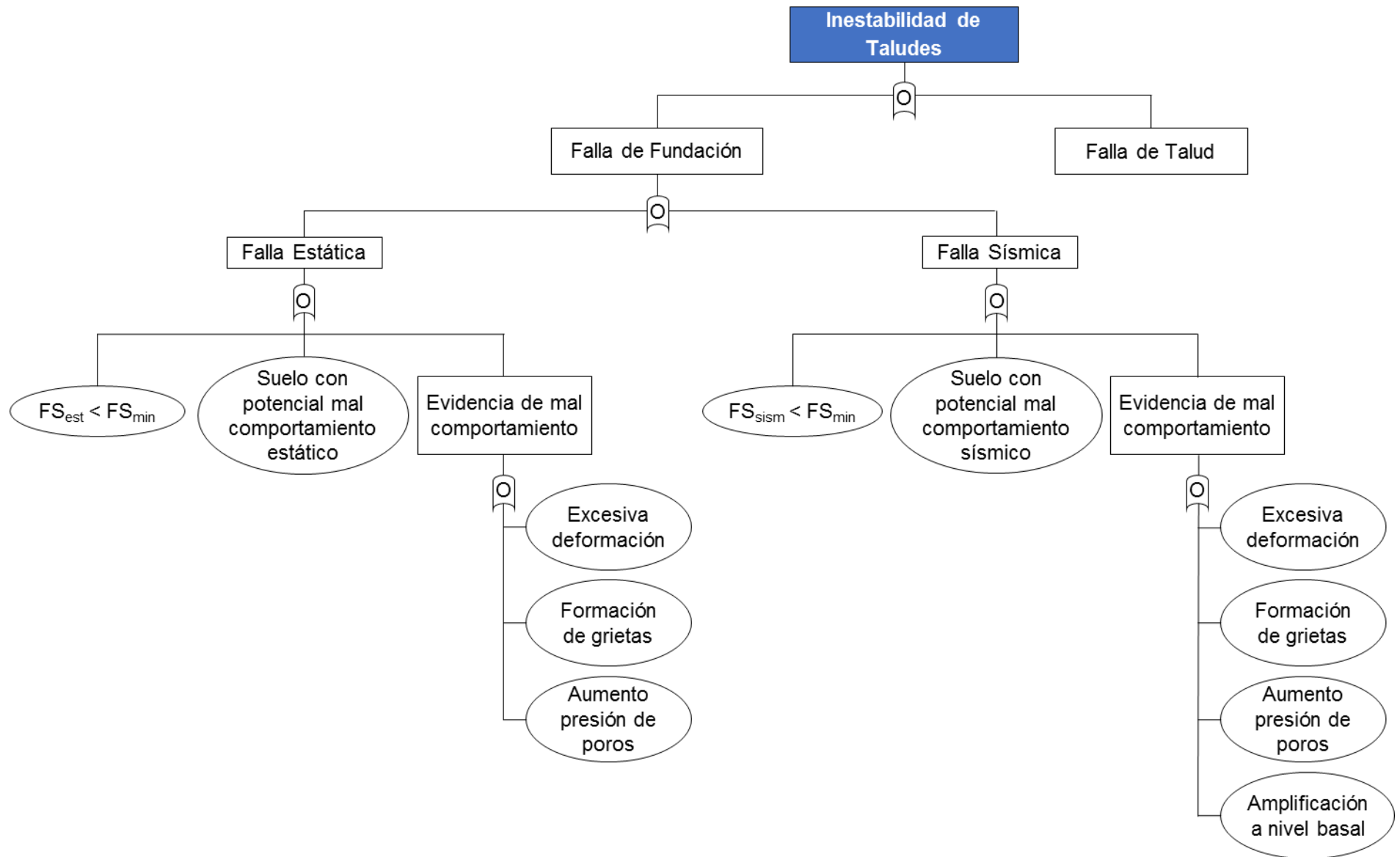


Figura 5.5. Árbol de Falla para la ocurrencia de Inestabilidad de Taludes – Falla de Fundación.

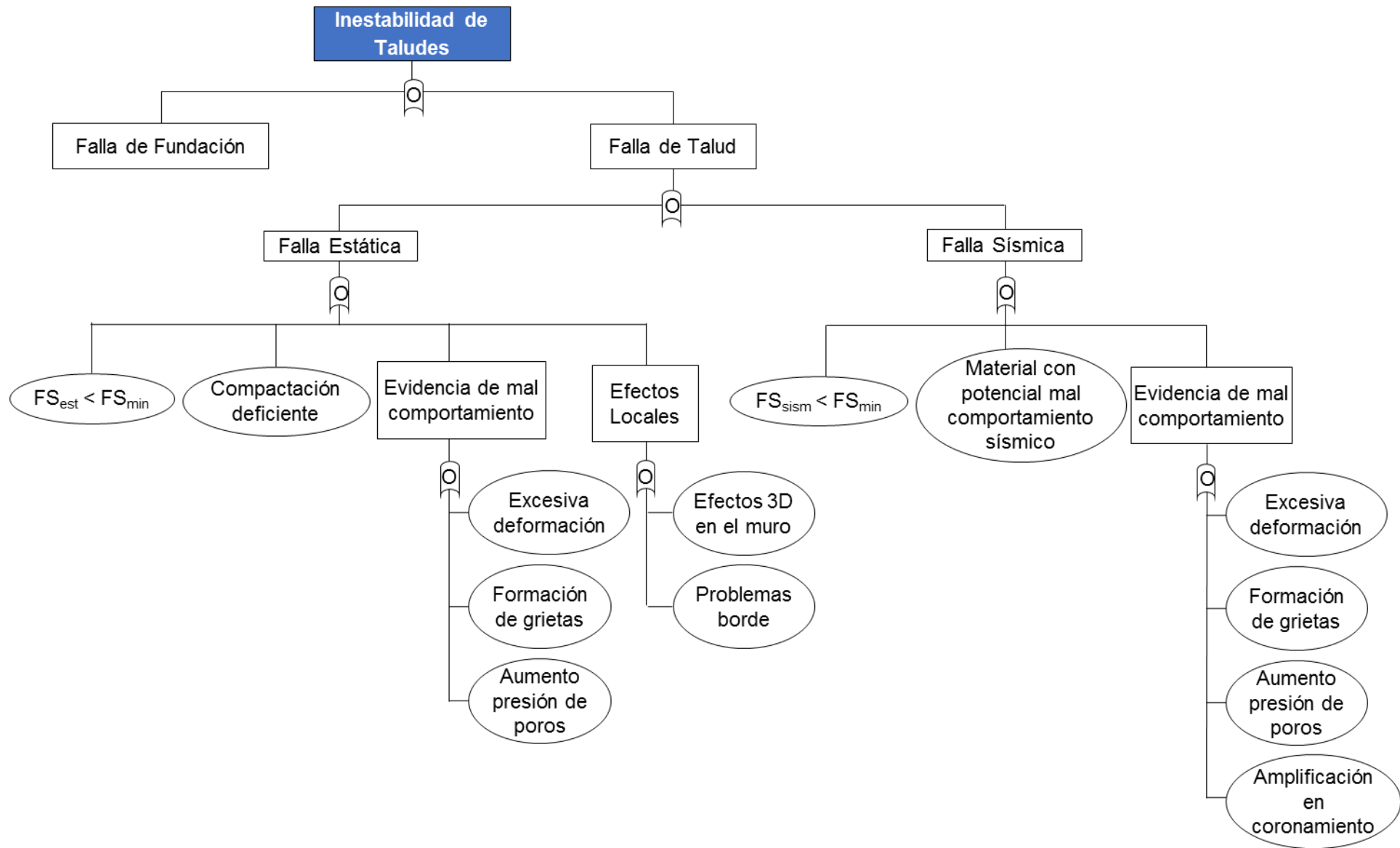


Figura 5.6. Árbol de Falla para la ocurrencia de Inestabilidad de Taludes – Falla de Talud.

5.3.2 Erosión Interna

Como se mencionó anteriormente, el fenómeno de erosión interna se puede dividir en tres, como se muestra en el esquema de la Figura 5.7.

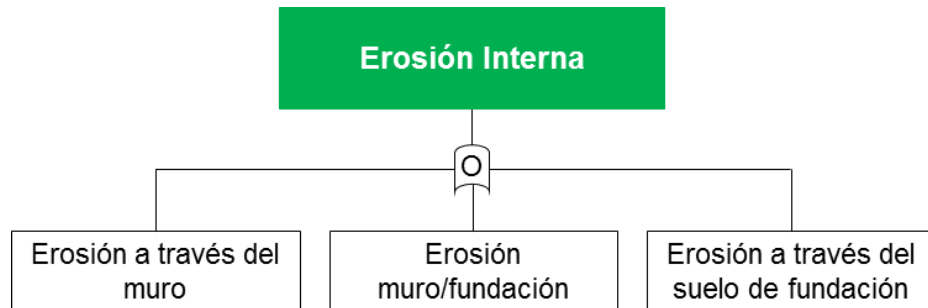


Figura 5.7. Clasificación de tipos de erosión interna

En esta oportunidad se generó el árbol de falla para la erosión que ocurre a través del muro, debido a que es el caso más común, considerando además que existen causas en común entre este tipo de erosión y la erosión a través del muro y la fundación, y a través de sólo el suelo de fundación.

El esquema de la Figura 5.8 representa el árbol de falla para la ocurrencia de erosión a través del muro. Este árbol tiene como base que existen cuatro clases de erosión interna, donde cada una tiene eventos raíces que gatillan su desarrollo, sólo si ocurren de forma simultánea (conector Y). Estas clases y sus respectivas raíces son las siguientes:

1) Erosión en contacto:

- Materiales incompatibles. Asociado a errores en las etapas de diseño y operación, hace referencia a materiales cuyas granulometrías sean muy diferentes entre sí, generando una notoria división entre ellos.
- Red de flujo desfavorable para la situación de incompatibilidad de materiales. El flujo de agua tiende a pasar entre las capas de suelos diferentes, lavándolo el material y generando el proceso de erosión.

2) Erosión retrógrada:

- Evidencia en superficie y/o en taludes. Estas evidencias pueden ser manchas de humedad y/o filtraciones.
- Gradiente hidráulico mayor al crítico.

3) Sufusión:

- Condiciones de susceptibilidad. Para que se den estas condiciones, se debe tener problemas en el estado tensional al que está sometido el suelo, en el nivel de compactación y en la granulometría.

- Red de flujo desfavorable que, sumada a la ocurrencia de al menos una condición de susceptibilidad, ayuda a que los finos de la matriz de suelo asciendan, ayudando al desarrollo de la erosión interna.

4) Flujo concentrado:

- Formación de grietas, ya sea mediante asentamientos diferencias o por localización de deformaciones en el muro.
- Red de flujo desfavorable, donde el flujo de agua aumente el tamaño de las grietas.

La ocurrencia de cualquiera de estos cuatro tipos de erosión interna genera la iniciación del mecanismo de falla. Si además existen errores o faltas en la detección e intervención de la erosión, el proceso pasa a una etapa de progresión, durante el cual, si se cometen errores o falta en la intervención, se da lugar a la falla por erosión interna a través del muro de contención.

En este caso, un error en la detección e intervención tiene cuatro causas raíces, donde basta con que se dé una para que ocurra la falta. Estas causas son:

- Error de monitoreo de caudales
- Error de monitoreo de filtraciones
- Error de monitoreo de presión de poros
- Falta de intervención

Cabe destacar que, si bien las causas raíces del error en detección e intervención son iguales tanto para la progresión como para la causa directa de erosión interna, éstas pueden tener asignadas probabilidades distintas, debido a que reflejan diferentes etapas del fenómeno.

Las causas raíces que definen el árbol de falla por erosión interna se describen en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11. Descripción de Causas Raíces para Erosión Interna

	Causa Raíz	Descripción
1	Materiales incompatibles	Probabilidad que existan materiales que no cumplan criterios de filtro, y que se genere una clara zona de contacto entre ellos.
2	Red de flujo desfavorable	Probabilidad que exista un flujo que facilite la separación, en la zona de contacto, entre distintos materiales.
3	Evidencia en superficie y/o en taludes	Probabilidad que se observe evidencia de erosión retrógrada, tanto en superficie como en los taludes del muro del depósito.
4	Gradiente hidráulico mayor al crítico	Probabilidad que se genere un gradiente hidráulico más alto que el valor crítico. Este gradiente hidráulico puede ser calculado con los

		datos de instrumentación y modelos numéricos basados en la solución de la ecuación de Laplace.
5	Estado tensional	Probabilidad que se tengan cargas mayores a las consideradas en el diseño, generando un estado tensional distintos al esperado. El estado tensional puede variar con cambios en la depositación de relaves, en el nivel freático, entre otros.
6	Compactación	Probabilidad que se compacte a un nivel inferior al establecido, con respecto a los rangos de aceptabilidad recomendados.
7	Granulometría susceptible	Probabilidad que la granulometría del material sea susceptible al fenómeno de sufusión, donde las partículas finas migran del esqueleto granular.
8	Red de flujo desfavorable	Probabilidad que exista una alta velocidad de flujo que permita la migración de partículas finas del material.
9	Asentamientos diferenciales	Probabilidad que se generen asentamientos diferenciales en el terreno y/o en el muro de contención, las que pueden ayudar en la formación de grietas.
10	Localización de deformaciones	Probabilidad que se generen deformaciones en un punto específico del depósito y/o del muro, facilitando la formación de grietas en esa zona.
11	Red de flujo desfavorable	Probabilidad que exista un flujo que aumente el tamaño de las grietas, facilitando así un flujo concentrado a través de éstas.
12	Error de monitoreo de caudales	Probabilidad que los instrumentos y/o técnicas de monitoreo de caudales presenten fallas o error en sus lecturas.
13	Error de monitoreo de filtraciones	Probabilidad que los instrumentos y/o técnicas de monitoreo de filtraciones presenten fallas o error en sus lecturas.
14	Error de monitoreo de presión de poros	Probabilidad que los instrumentos y/o técnicas de monitoreo de presiones de poros presenten fallas o error en sus lecturas.
15	Falta de intervención	Probabilidad que, una vez detectado algún error o falla en el funcionamiento del depósito, no se intervenga de la manera correcta, permitiendo el desarrollo de una falla mayor.

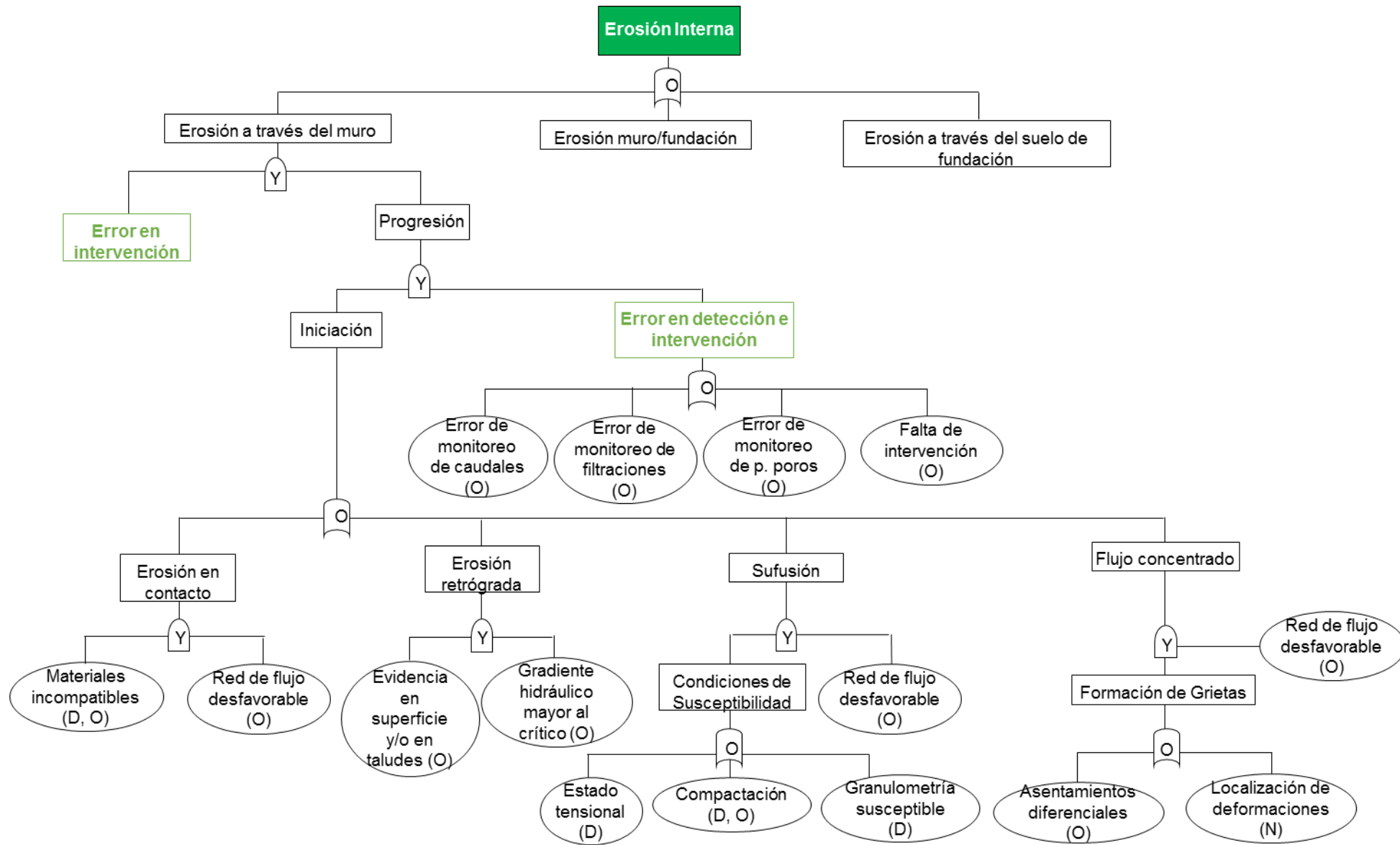


Figura 5.8. Árbol de Falla para la ocurrencia de Erosión Interna.

5.3.3 Rebalse

Para este mecanismo de falla, se definen tres causas directas, que corresponden a rebalse por reducción del coronamiento, rebalse por incremento de la laguna, y rebalse por ola. Con esta clasificación, se tiene una rama asociada al muro, otra asociada a la laguna, y otra que tiene relación con la generación de olas en el depósito.

La primera rama, tiene como causas raíces asentamientos mal predichos en etapa de diseño, asentamientos co-sísmicos y corrimientos laterales del muro. La ocurrencia de cualquiera de estos tres eventos genera una deformación en el coronamiento. Si se presenta esta deformación o se observa erosión en el coronamiento del muro, se da pie a una reducción de altura del muro.

Por otro lado, se define la presencia de una laguna desfavorable, como consecuencia de la ubicación de la laguna cerca del muro y de un evento intermedio denominado "Revanca Insuficiente". Este evento ocurre cuando se tiene al menos una de las siguientes causas raíces:

- Revanca fuera de diseño
- Retraso en crecimiento del muro
- Excesivo flujo de relave
- Bajo porcentaje de sólidos de relave
- Falla en sistema de recuperación
- Falla de drenes

Así, se tiene la ocurrencia de un rebalse por reducción del coronamiento, si se genera una reducción de altura del coronamiento en conjunto con una laguna desfavorable.

Respecto a la causa directa del árbol, correspondiente a un rebalse por incremento de la laguna, se deben dar tres condiciones simultaneas para su desarrollo. Estas condiciones son: tener una revanca insuficiente, que se desarrolle un evento climático que pueda generar desborde, o que ocurra una falla en el vertedero. Se considera un evento climático que puede causar desborde a aquel que se observa cuando hay una lluvia fuerte o un deshielo rápido.

Por último, la rama relacionada con rebalse por ola considera la ocurrencia de una laguna desfavorable, una revanca insuficiente y la generación de olas, donde las tres deben darse en conjunto. La generación de olas se puede dar en presencia de vientos fuertes, por deslizamientos de material en la cubeta y por un sismo que sea mayor al utilizado en la etapa de diseño.

De manera más específica, la Tabla 5.12 presenta la descripción de las causas raíces consideradas para este mecanismo de falla, mientras que la Figura 5.9 muestra el esquema del árbol de falla para rebalse.

Tabla 5.12. Descripción de Causas Raíces para Rebalse.

	Causa Raíz	Descripción
1	Revancha fuera de diseño	Probabilidad que se mida un valor de revancha menor al establecido en etapa de diseño del depósito, o al valor entregado por normativa (mínimo de 1 metro de acuerdo con el SERNAGEOMIN)
2	Retraso en crecimiento del muro	Probabilidad que la velocidad a la que crece el muro de contención sea menor a la declarada en el diseño del depósito.
3	Excesivo flujo de relaves	Probabilidad que se deposite una cantidad mayor de relaves a la definida en el diseño del depósito.
4	Bajo porcentaje de sólidos de relave	Probabilidad que el relave depositado contenga un porcentaje de sólidos menor al definido en el diseño del depósito.
5	Falla en sistema de recuperación	Probabilidad que el sistema de recuperación de aguas del depósito presente fallas, evitando que se libere agua del depósito, ayudando a aumentar su cota.
6	Falla de drenes	Probabilidad que el funcionamiento del sistema de drenaje falle, ya sea de manera parcial o total.
7	Lluvia fuerte	Probabilidad que ocurran eventos climáticos de lluvias fuertes, que influyan en el nivel del depósito de relaves.
8	Deshielo rápido	Probabilidad que ocurra un evento de deshielo rápido, aumentando el volumen almacenado en el depósito.
9	Falla vertedero de emergencia	Probabilidad que se obstruya o falle el vertedero de emergencia del muro del depósito de relaves, impidiendo su utilización en caso de emergencia.
10	Laguna cerca del muro	Probabilidad que la distancia entre la laguna y el muro sea menor a la esperada, que corresponde a la máxima posible.
11	Vientos fuertes	Probabilidad que ocurran eventos de vientos fuertes, que generen olas o ayuden al desplazamiento de la laguna hacia el muro.
12	Deslizamientos en cubeta	Probabilidad que se generen desprendimientos de material del terreno dentro del depósito, aumentando su volumen y/o generando posibles desplazamientos de la laguna hacia el muro, o de relave sobre su muro de contención.
13	Asentamientos mal predichos	Probabilidad que los asentamientos del depósito estén mal calculados en el diseño, y se midan asentamientos mayores en terreno.
14	Asentamientos co-sísmicos	Probabilidad que, debido a un evento sísmico, se generen asentamientos en el depósito.

15	Corrimientos laterales	Probabilidad que se observen desplazamientos horizontales en el muro y/o en el depósito de relaves.
16	Erosión del coronamiento	Probabilidad que se erosione el coronamiento del muro, ya sea por razones naturales (viento, por ejemplo), o por razones de operación.

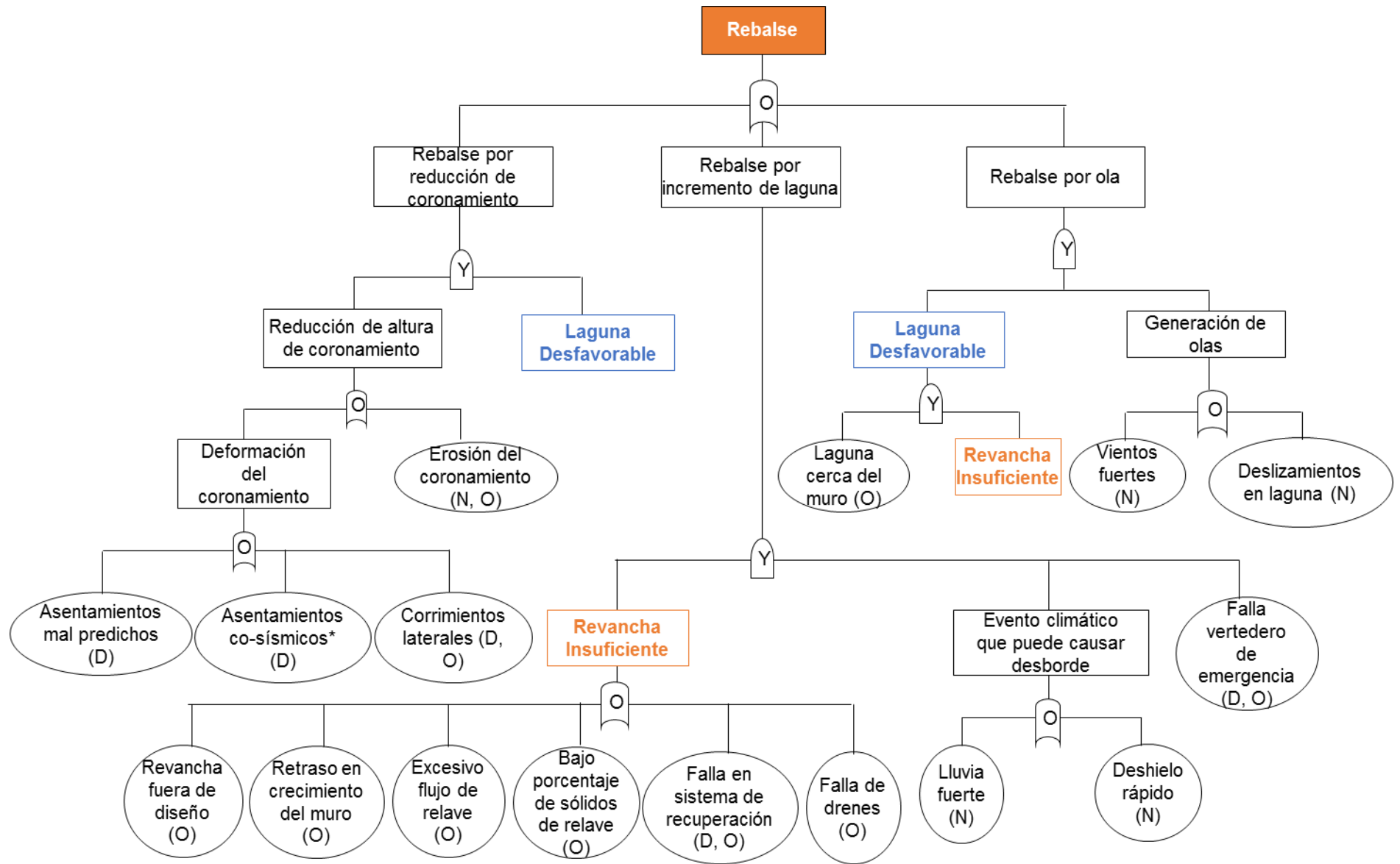


Figura 5.9. Árbol de Falla para la ocurrencia de Rebalse.

5.4 Asignación de Probabilidades

En función de la bibliografía revisada asociada a árboles de falla, es posible asignarle a cada evento raíz, una probabilidad de ocurrencia. Las Tablas Tabla 5.13 a Tabla 5.16 muestran las probabilidades asignadas, junto a su respectiva referencia como nota.

Tabla 5.13. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para inestabilidad estática de taludes

Descripción	Probabilidad
Aumento de presión de poros	0,005 ^(1,2)
Materiales inadecuados	0,005 ⁽¹⁾
Falla en detección de material inadecuado	0,005 ⁽¹⁾
Desviación operacional	0,005 ⁽¹⁾
Cambio en comportamiento de materiales	0,002 ⁽¹⁾
Aumento de presión de poros	0,005 ⁽¹⁾
Cambios Geométricos	0,002 ⁽¹⁾
Licuación estática	0,00019 ⁽¹⁾
Condiciones similares al diseño	0,0001 ⁽¹⁾
Falla en detección	0,0050 ⁽¹⁾

Notas:

(1) Taguchi, 2014

(2) Baecher & Christian, 2003

Tabla 5.14. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para inestabilidad sísmica de taludes

Descripción	Probabilidad
Aumento de presión de poros	0,0050 ⁽¹⁾
Material con comportamiento cíclico inadecuado	0,050 ⁽¹⁾
Falla en detección de material inadecuado	0,0050 ⁽¹⁾
Cambio en comportamiento de materiales	0,002 ⁽¹⁾
Aumento de presión de poros	0,005 ⁽¹⁾
Cambios Geométricos	0,002 ⁽¹⁾
Movilidad cíclica	0,0010 ⁽²⁾
Sismo mayor al de diseño	0,0050 ⁽¹⁾
Condiciones similares al diseño	0,0001 ⁽¹⁾
Falla en detección	0,0050 ⁽¹⁾

Notas:

(1) Taguchi, 2014

(2) Baecher & Christian, 2003

Tabla 5.15. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para Erosión Interna.

Descripción	Probabilidad
Materiales incompatibles	0,0050 ⁽¹⁾
Red de flujo desfavorable	0,0100 ⁽¹⁾
Evidencia en superficie y/o en taludes	0,0010 ⁽²⁾
Gradiente hidráulico mayor al criterio	0,0010 ⁽¹⁾
Estado tensional	0,0050 ⁽¹⁾
Compactación	0,0050 ⁽¹⁾
Granulometría susceptible	0,0050 ⁽¹⁾
Red de flujo desfavorable	0,0100 ⁽¹⁾
Asentamientos diferenciales	0,0025 ⁽¹⁾
Localización de deformaciones	0,0025 ⁽¹⁾
Red de flujo desfavorable	0,0100 ⁽¹⁾
Error de monitoreo de caudales	0,2500 ⁽²⁾
Error de monitoreo de filtraciones	0,2500 ⁽²⁾
Error de monitoreo de presión de poros	0,0010 ⁽²⁾
Falta en intervención	0,0050 ⁽¹⁾

Notas:

(1) Taguchi, 2014

(2) Baecher & Christian, 2003

Tabla 5.16. Probabilidad de ocurrencia de causas raíces para Rebalse.

Descripción	Probabilidad
Asentamientos mal predichos	0,0025 ⁽¹⁾
Asentamientos co-sísmicos	0,0025 ⁽¹⁾
Corrimientos laterales	0,0100 ⁽¹⁾
Erosión del coronamiento	0,0025 ⁽¹⁾
Revanca fuera de diseño	0,0025 ⁽¹⁾
Retraso en crecimiento del muro	0,0050 ⁽¹⁾
Excesivo flujo de relaves	0,0050 ⁽¹⁾
Bajo porcentaje de sólidos de relave	0,0050 ⁽¹⁾
Falta en sistema de recuperación	0,0050 ⁽¹⁾
Falla de drenes	0,0050 ⁽¹⁾
Lluvias fuertes	0,0100 ⁽¹⁾
Deshielo rápido	0,0100 ⁽¹⁾
Falla en vertedero de emergencia	0,0050 ⁽¹⁾
Laguna cerca del muro	0,0050 ⁽¹⁾
Vientos fuertes	0,0100 ⁽¹⁾
Deslizamientos en cubeta	0,0100 ⁽¹⁾

Notas:

(1) Taguchi, 2014

(2) Baecher & Christian, 2003

5.5 Evaluación de Árboles de Falla

Las probabilidades previamente mostradas pueden ser modificadas dependiendo del estado en el que se encuentre cada parámetro al momento de la evaluación. Además, se pueden ver afectadas por eventos naturales, cambios en la operación del depósito o en su etapa de monitoreo. Estos cambios en los valores de probabilidad permiten que el índice vaya cambiando en el tiempo.

Para representar este cambio, se definen tres niveles de probabilidad para cada causa raíz, representados a través de coeficientes α y β menores que 1 y distintos entre sí. Así, las probabilidades que se asignan pueden ser designadas, de mayor a menor, como P , βP y αP , siendo P el valor asociado a cada causa raíz de las tablas Tabla 5.13 a Tabla 5.16, según sea el mecanismo de falla en estudio.

Es posible obtener la probabilidad de ocurrencia de un mecanismo de falla si, dado valores de α y β fijos, se escogen de forma aleatoria las probabilidades de cada evento entre los tres mencionados anteriormente (P , βP y αP) y se evalúa el árbol de falla correspondiente. Si este proceso se repite varias veces, asignando cada vez las probabilidades de forma aleatoria, es posible obtener una distribución de valores del índice de estabilidad física, para cada mecanismo de falla.

Las figuras Figura 5.10 a Figura 5.12 muestran las distribuciones de probabilidad obtenidas para cada mecanismo de falla, considerando $\alpha=0,3$ y $\beta=0,6$. Además, se indica el valor obtenido por de la Cruz (2017), el cual se encuentra dentro de las distribuciones obtenidas para los casos de Inestabilidad de Talud y Erosión Interna, mientras que para Rebalse, la distribución de probabilidad se encuentra por debajo del valor de la literatura.

Inestabilidad de Taludes:

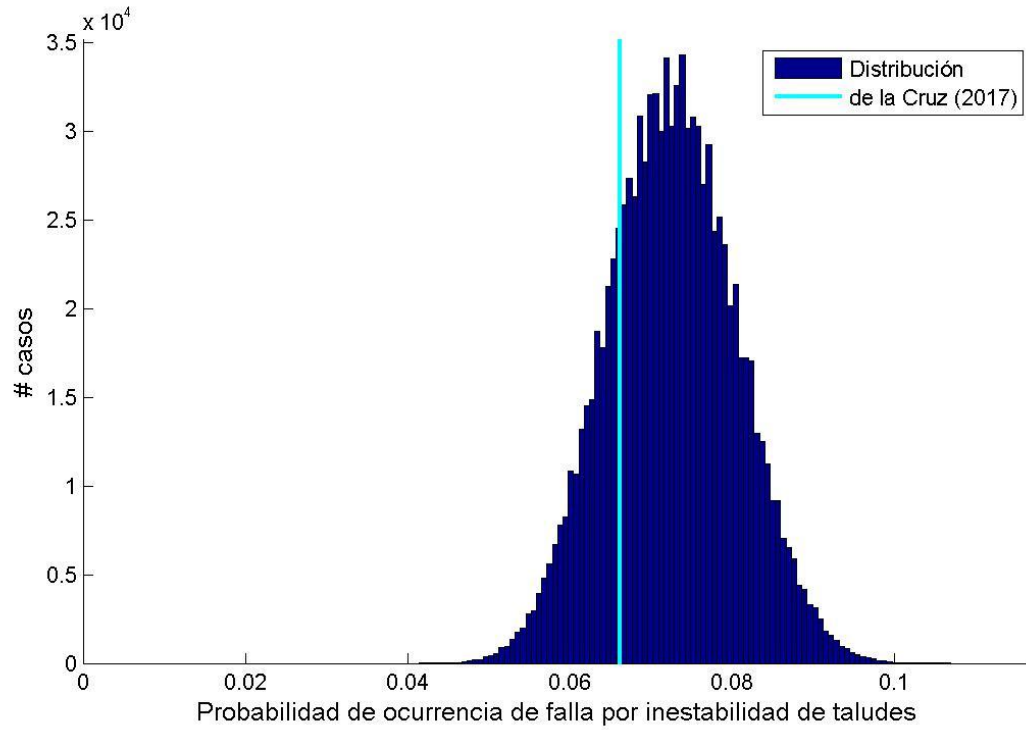


Figura 5.10. Distribución de Probabilidad de falla por Inestabilidad de Taludes.

Erosión Interna:

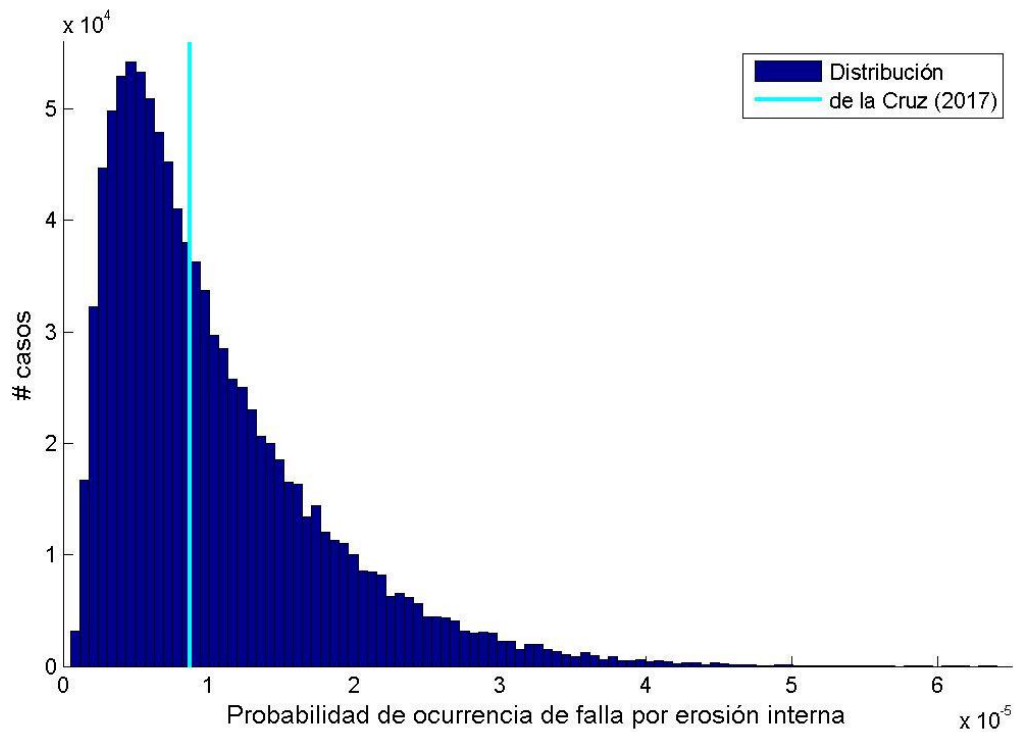


Figura 5.11. Distribución de Probabilidad de falla por Erosión Interna.

Rebalse:

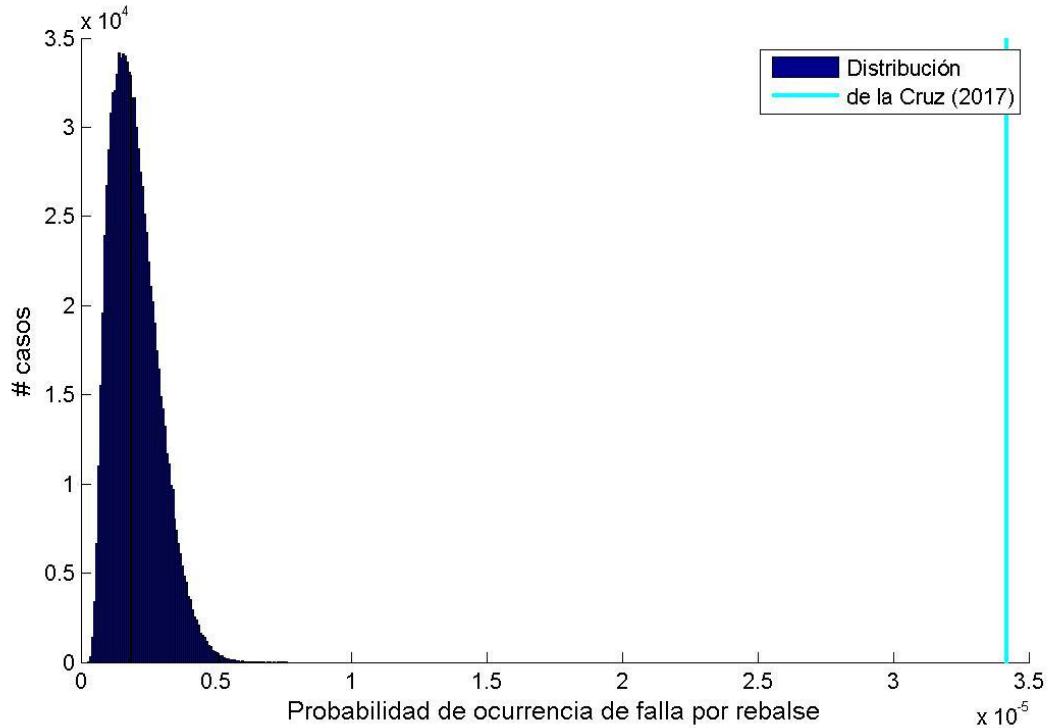


Figura 5.12. Distribución de Probabilidad de falla por Rebalse.

5.6 Sensibilidad de Árboles de Falla

En base a las probabilidades presentadas, se estudia la sensibilidad que tiene el índice entregado por el árbol de falla, ante un cambio en alguna de sus causas raíces. En primer lugar, se analiza el cambio en el índice modificando la probabilidad de ocurrencia de cada evento raíz en $\pm 20\%$ y $\pm 50\%$. El resultado de esto se muestra en las Figuras Figura 5.13, Figura 5.14, Figura 5.15 y Figura 5.16.

Otra forma de evaluar la sensibilidad que tienen los Árboles de Falla ante un cambio en el valor de alguna causa raíz, es siguiendo la metodología de evaluación iterativa explicada anteriormente, pero fijando la probabilidad del evento en estudio, en su valor mínimo y su valor máximo. Las figuras Figura 5.17, Figura 5.18 y Figura 5.19 muestran la sensibilidad que tienen los árboles de falla para inestabilidad de taludes, erosión interna y rebalse, respectivamente. En estas figuras, el gráfico superior representa la distribución con todas sus raíces obtenidas de forma aleatoria, el gráfico central corresponde a la distribución obtenida fijando la causa raíz en estudio en su valor mínimo (αP), y el gráfico inferior muestra la distribución resultante fijando la causa raíz en su valor máximo (P). Se puede observar que la distribución se desplaza hacia la izquierda o derecha cuando se fija la probabilidad en su valor mínimo o máximo, respectivamente. A los gráficos mencionados se les incorpora una recta de color rojo que representa el máximo número de casos obtenido, considerando todas las raíces aleatorias, la cual ayuda a observar de mejor forma el corrimiento de las distribuciones. Además, para cada mecanismo de falla se muestra el resultado para los eventos que tienen menor y mayor impacto en la distribución.

Inestabilidad de Taludes – Falla de Fundación:

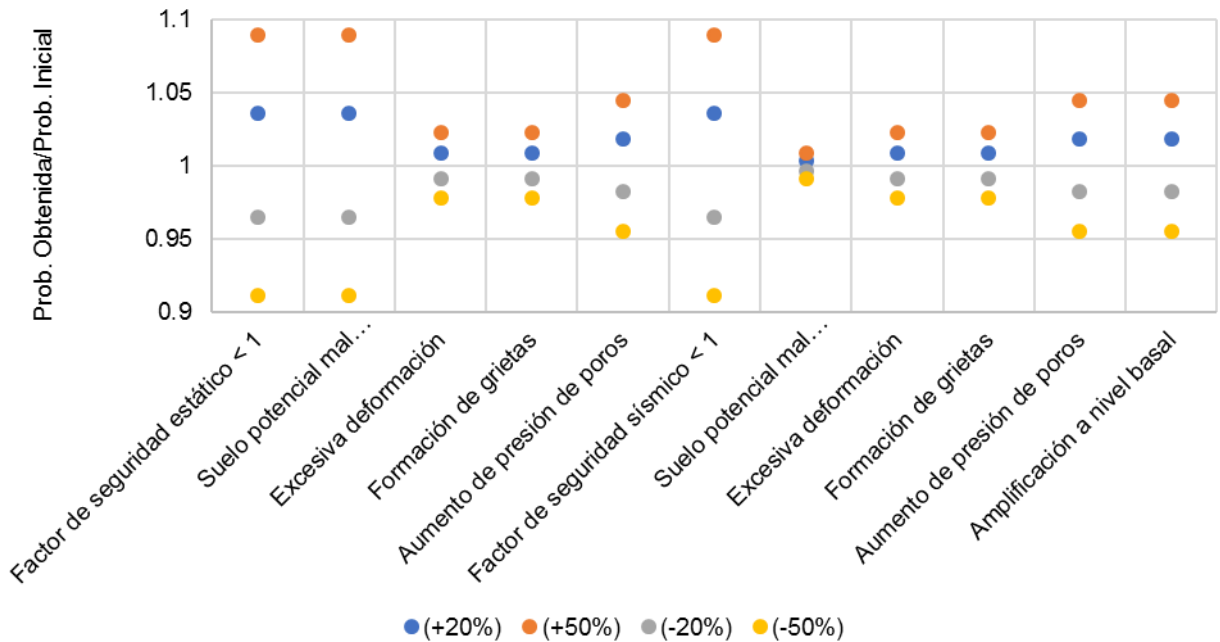


Figura 5.13. Sensibilidad de IEF para Inestabilidad de Taludes – Falla de Fundación.

Inestabilidad de Taludes – Falla de Talud:

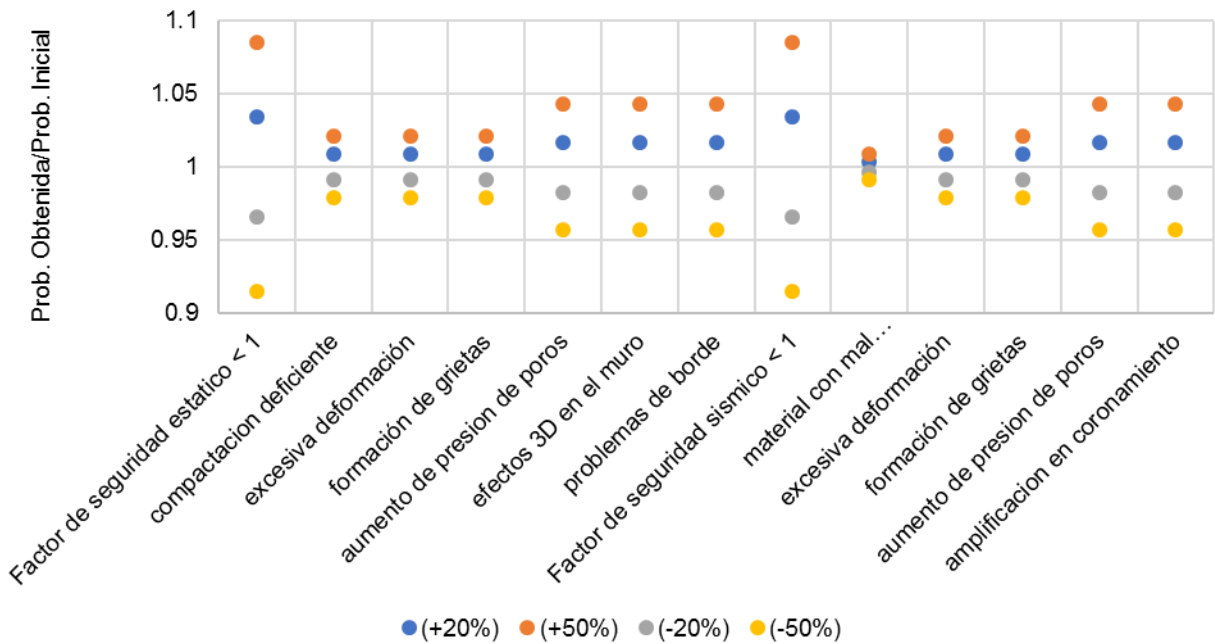


Figura 5.14. Sensibilidad de IEF para Inestabilidad de Taludes – Falla de Talud.

Erosión Interna:

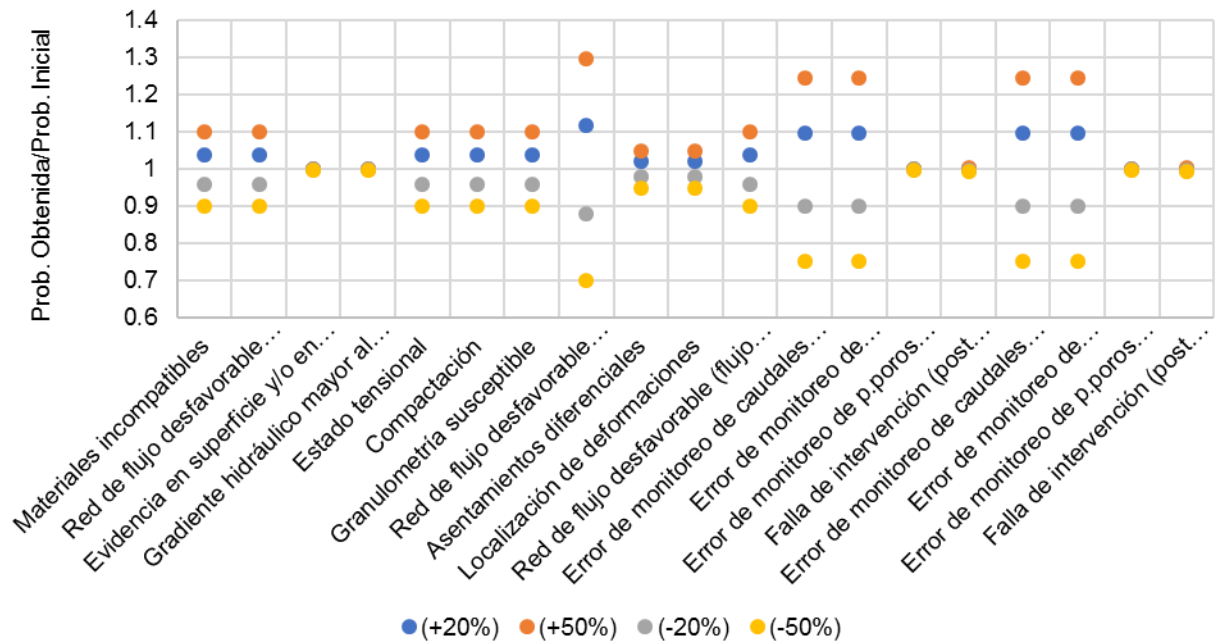


Figura 5.15. Sensibilidad de IEF para Erosión Interna.

Rebalse:

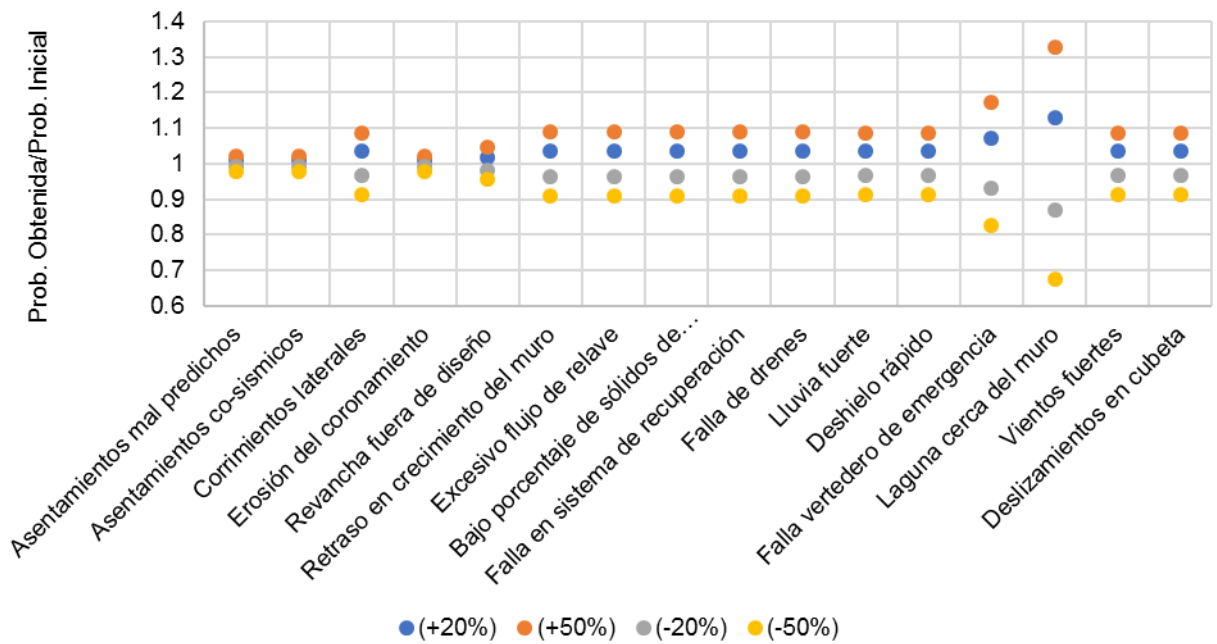


Figura 5.16. Sensibilidad de IEF para Rebalse.

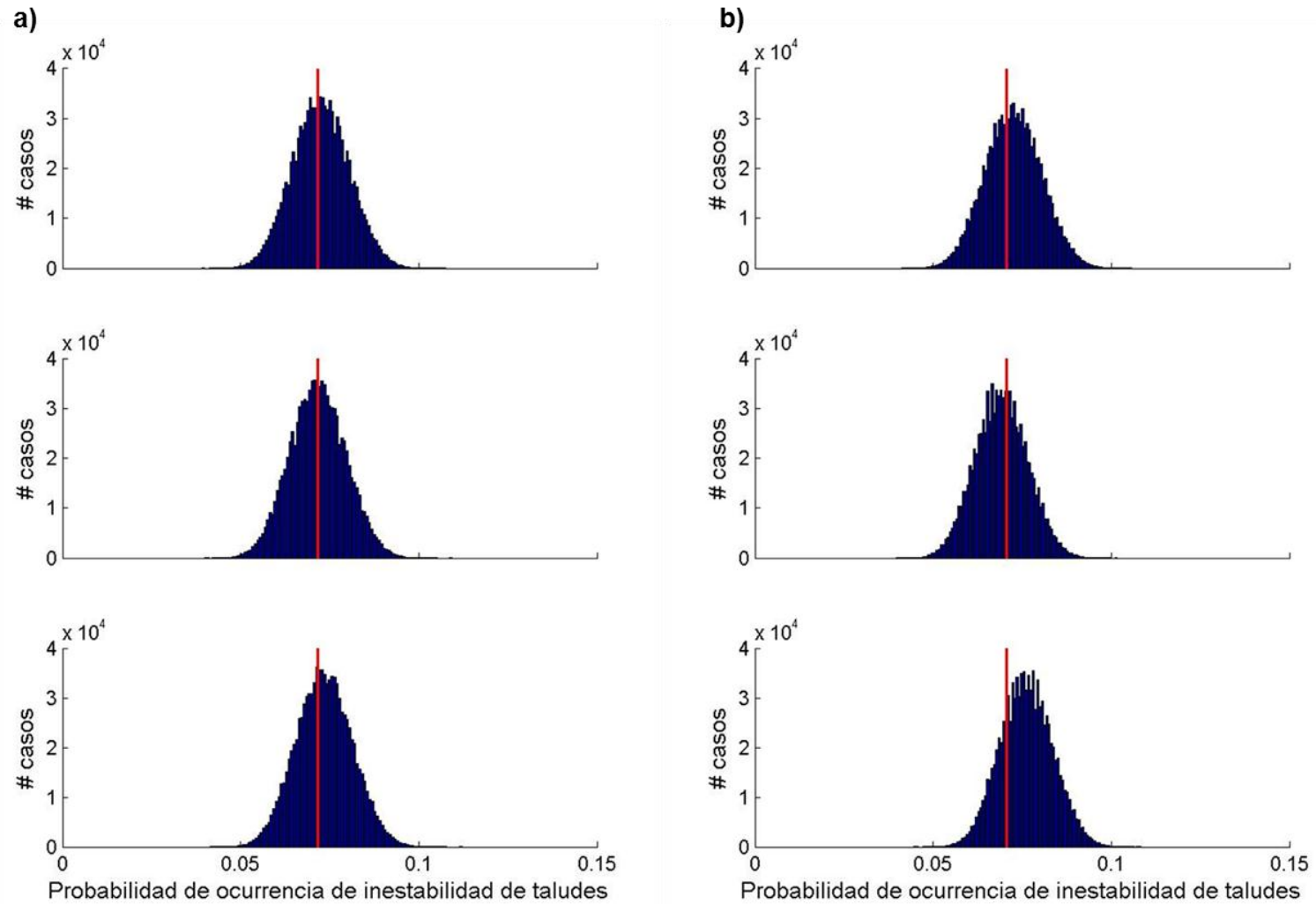


Figura 5.17. Sensibilidad de la distribución de probabilidad de inestabilidad de taludes, ante un cambio en: a) formación de grietas en falla de fundación y b) el factor de seguridad estático.

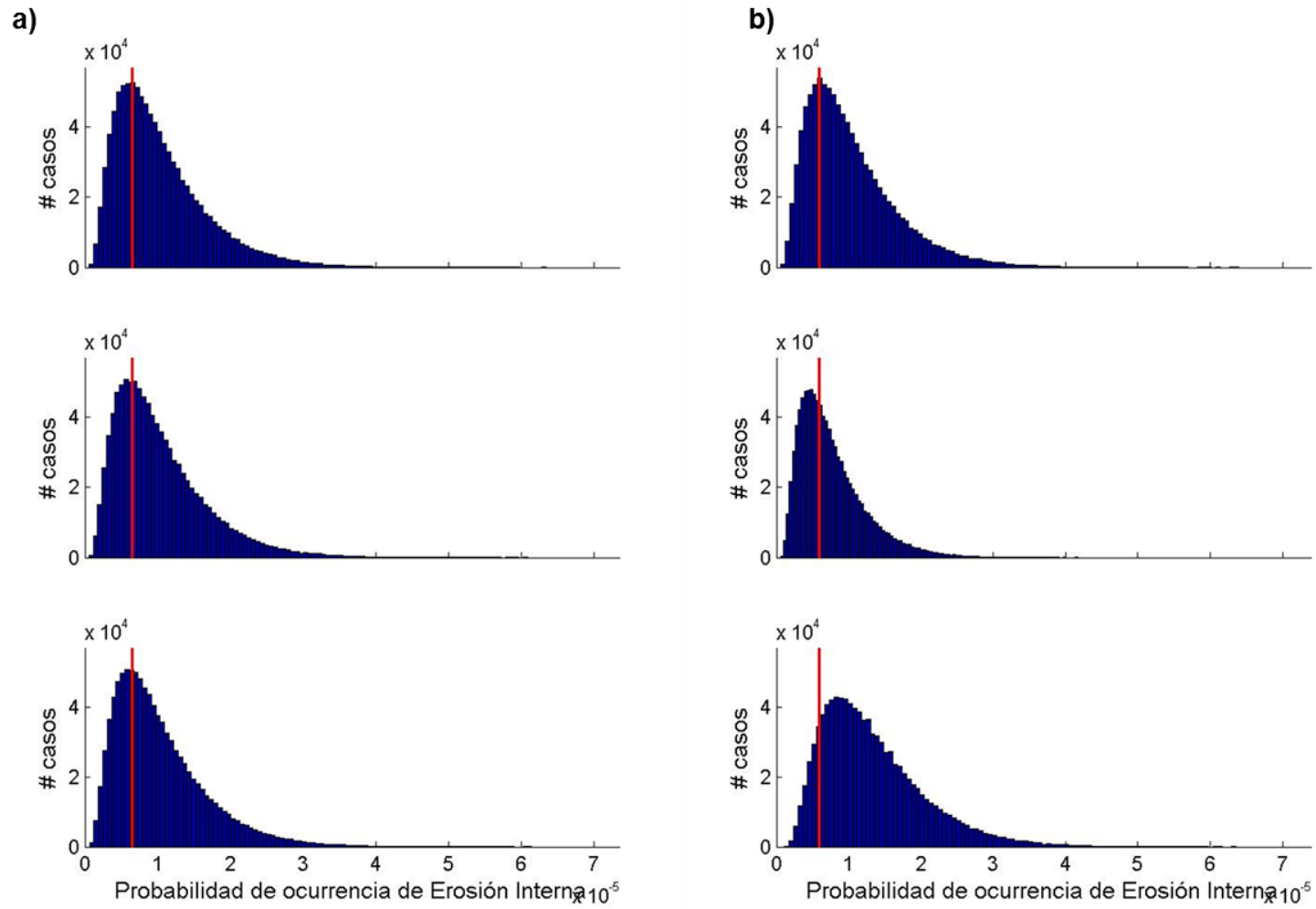


Figura 5.18. Sensibilidad de la distribución de probabilidad de erosión interna, ante un cambio en a) error en monitoreo de presión de poros y b) error en monitoreo de filtraciones

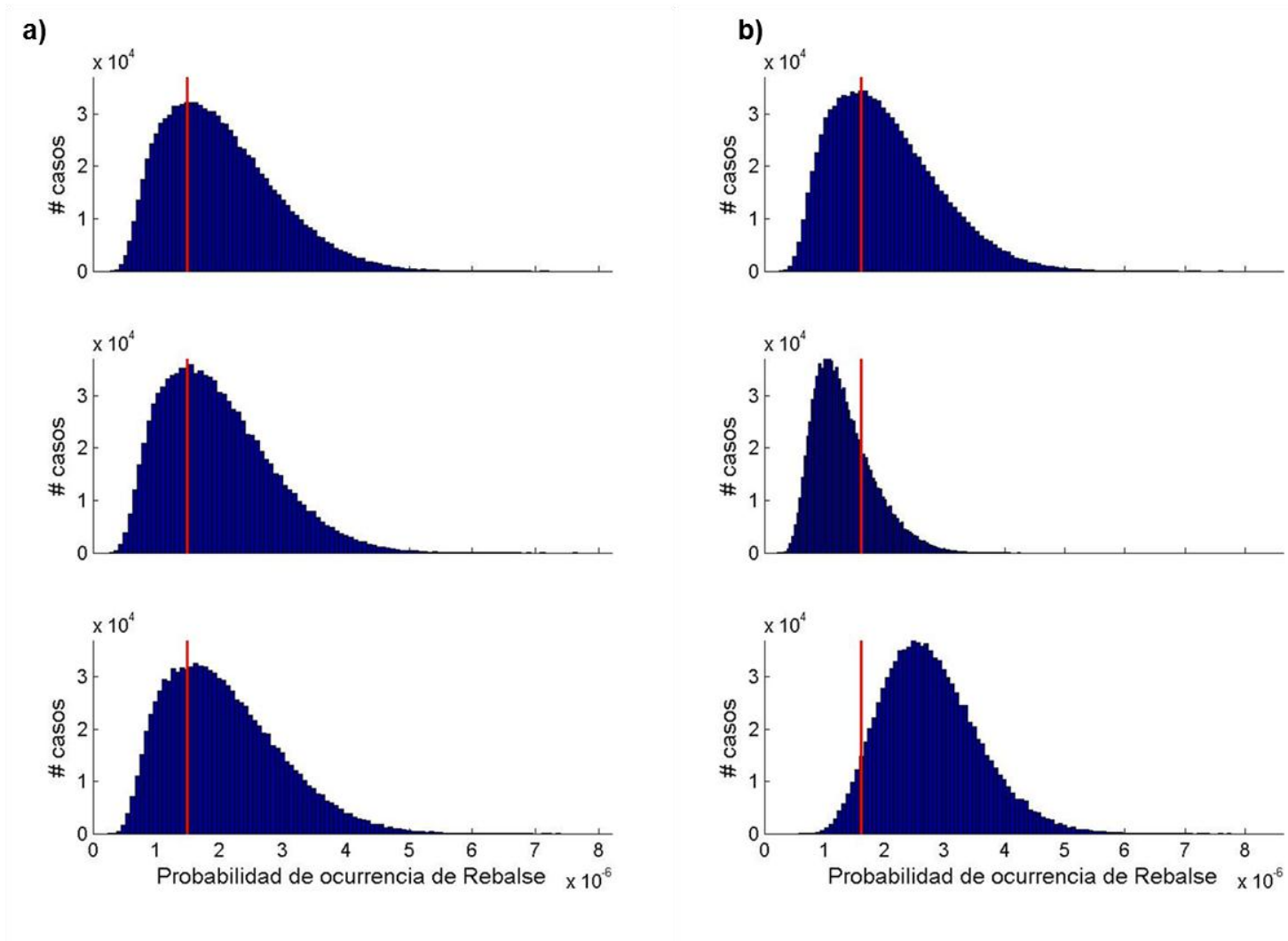


Figura 5.19. Sensibilidad de la distribución de probabilidad de rebalse, ante un cambio en a) erosión del coronamiento y b) laguna cerca del muro.

6 Análisis y Discusión

La metodología propuesta en este trabajo corresponde a un primer acercamiento a lo que podría ser una herramienta de evaluación de estabilidad física de depósitos de relave, pensado en depósitos de relave convencional, pero aplicable a todo tipo de depósito, haciendo de éste un proceso más homogéneo. Si bien se pueden mencionar distintas formas de aplicar esta metodología, se discutirá sobre propuesto y presentado en este trabajo.

Respecto a la Evaluación Cualitativa, este módulo del IEF cuenta con condiciones generales que la mayoría de los depósitos de relaves permite evaluar (exceptuando aquellos que no cuentan con muro de contención). Este módulo cumple con su objetivo de alertar y activar el protocolo asociado a baja estabilidad en caso de que se presente alguna alteración en un depósito de relaves. Respecto a la evaluación propiamente tal, es probable que una gran cantidad de depósitos de relaves no cumplan con la evaluación cualitativa, o se vean limitados a tolerar sólo uno o dos factores agravantes. Sin embargo, este módulo permite a las empresas mineras verificar si cuentan con los aspectos mínimos para poder analizar la condición de estabilidad de sus depósitos.

Como se mencionó anteriormente, este módulo es el de menor complejidad y el que requiere la menor cantidad de información para ser evaluado. Sin embargo, existen otras herramientas que podrían considerarse en este nivel del cálculo del índice de estabilidad física como lo es, por ejemplo, la definición de escenarios de riesgo, y la clasificación de éstos en significativos y no significativos, herramientas utilizadas actualmente con el SERNAGEOMIN en su Manual de Evaluación de Riesgos de Faenas Mineras Abandonadas o Paralizadas

Pasando a la verificación de parámetros críticos, ésta se realiza para cada parámetro de manera individual, sin considerar tendencias ni efectos acoplados con otros parámetros críticos, debido a que este dificulta la evaluación. Además, este análisis no permite diferenciar entre aquellos parámetros que tienen más importancia. Por otro lado, se consideran umbrales definidos de forma general, sin considerar que existen parámetros que son sitio-específicos.

Como se mencionó anteriormente, si un parámetro crítico se encuentra fuera del umbral, se asigna un IEF bajo y se activa el protocolo correspondiente. Ésta corresponde a una medida conservadora, ya que se debe considerar que no siempre es posible determinar si una medición se encuentra fuera de rango debido a un mal funcionamiento del sensor o del sistema de medición.

Por último, esta propuesta considera el desarrollo de un análisis de árboles de falla para la determinación del índice de estabilidad física. Una de las ventajas de este método es que, al ser gráfico, permite entender la línea de causalidad detrás de un evento no deseado. Sin embargo, su evaluación es compleja, debido a que determinar las probabilidades de ocurrencia de cada causa o evento depende del nivel de información con el que se cuente.

Como se vio en este trabajo, la mayoría de los depósitos de relave en Chile se encuentran en un estado de abandono, los cuales no cuentan con sistemas de monitoreo y control, por lo que no se cuenta con datos actualizados de estos. Una forma de solucionar esto, es contar con el juicio de expertos en el área, quienes entreguen información que permita estimar estas probabilidades. Además, dado que este índice comunica la estabilidad de los depósitos a las comunidades y autoridades, contar con un valor menor a 1 puede ser de difícil entendimiento.

En esta oportunidad se generaron árboles de falla para cada mecanismo de falla, en función de sus respectivos parámetros críticos y eventos gatilladores. Se priorizó el uso de causas que puedan ser monitoreadas, con el fin de contar con información actualizada y con tendencias del comportamiento de cada parámetro.

Utilizando las probabilidades determinadas principalmente por Taguchi (2014), se evaluó la sensibilidad del índice de estabilidad para cambios en cada evento raíz. Se puede observar que, para la falla de fundación, las causas raíces que tienen un mayor impacto en el resultado del índice son el factor de seguridad, tanto para caso estático como sísmico, y la presencia de un suelo con potencial mal comportamiento, mientras que, para la falla de talud, el factor de seguridad en caso estático y sísmico son los que tienen mayor efecto en el valor del índice de estabilidad física. Esto ocurre porque el árbol está formado sólo por conectores O (que representan suma), por lo que un cambio en la probabilidad de ocurrencia de algún evento raíz repercute de manera directa y proporcional en el valor del IEF. Dado que los eventos mencionados son aquellos que tienen la probabilidad de ocurrencia más alta entre las causas raíces consideradas, se obtiene un mayor efecto en el cambio del índice. De la misma forma, aquellos eventos que tienen asignada una probabilidad pequeña, como suelo con potencial mal comportamiento sísmico, tienen poco efecto en el índice.

Para el caso de falla por erosión interna, se observa que la causa raíz con mayor efecto sobre el valor del IEF corresponde a una red de flujo desfavorable en la generación de sufusión, seguido por un error en monitoreo de caudales y de filtraciones, tanto después de la iniciación como de la progresión. El efecto de la red de flujo desfavorable en la sufusión se debe a la combinación con el evento intermedio de “Condiciones de Susceptibilidad”, por ende, depende también de las probabilidades asignadas a los eventos raíces de este evento intermedio. Por otro lado, la poca influencia de eventos raíces como evidencia en superficie y/o en taludes, y gradiente hidráulico mayor al crítico, se debe a su pequeño valor de probabilidad, los cuales multiplicados entregan un valor aún menor.

Por último, para el árbol de falla por rebalse, la causa raíz que genera un mayor impacto sobre el valor del IEF corresponde a la ubicación de la laguna cerca del muro, lo cual se debe a que repercute sobre dos causas directas del árbol: Rebalse por reducción de coronamiento y Rebalse por ola (ya que es evento raíz de la causa directa de “Laguna Desfavorable”). Las causas raíces que impactan en menor magnitud sobre el índice (asentamientos mal predichos, asentamientos co-sísmicos y erosión del coronamiento) tienen asociadas probabilidad muy pequeñas en comparación con las raíces restantes, por lo que su efecto es menor. Un caso puntual corresponde a “Revancha fuera de

Diseño” que, si bien tiene la misma probabilidad que los eventos raíces con menor impacto, está asociada a un evento intermedio que repercute en dos causas directas (Rebalse por incremento de laguna y Rebalse por Ola), por lo que genera un impacto un poco mayor en el valor del IEF.

Por otra parte, del análisis de sensibilidad realizado con la asignación aleatoria de probabilidades para cada causa raíz, es posible observar que no todas tienen el mismo efecto sobre el resultado final, lo cual concuerda con lo esperado y con lo visto en el análisis de sensibilidad realizado previamente. La realización de este análisis ayuda en la modificación de los árboles de falla, con el objetivo de modificar ya sean los coeficientes como las probabilidades de cada raíz, con el fin de que representen de mejor forma lo que ocurre en la práctica.

7 Conclusiones

Como se ha mencionado a lo largo del trabajo, el principal objetivo de éste fue plantear una metodología que permitiera evaluar la condición de estabilidad física de los depósitos de relaves. En particular, la revisión de documentos internacionales permite determinar las brechas existentes entre lo que se hace en Chile y lo que se hace en otros países mineros, como Canadá y Australia.

Por otra parte, se pudo observar que el 81% de los depósitos corresponden a tranques de relaves, de los cuales menos del 10% se encuentra en estado activo. El análisis del estado actual de los depósitos de relaves da cuenta de la necesidad de un control más exigente sobre los depósitos no activos, en términos de la entrega y aprobación de sus resoluciones de cierre. El control de los depósitos (tranques en específico) que se encuentran en condiciones de inactividad constituiría un significativo avance en la estabilidad de estas obras, ya que constituyen al 66% del total de tranques de relave en el país. Respecto a las fallas ocurridas a nivel mundial, se desprende la importancia que tiene el control de los parámetros en todas las etapas en la vida de un depósito.

Se considera que existen tres mecanismos que controlan las fallas, los cuales son inestabilidad de taludes, erosión interna y rebalse. Conocer estos mecanismos de falla permite controlar y evitar accidentes en los depósitos de relaves.

Para estudiar la condición de estabilidad física de depósitos de relaves, se propone una metodología que tiene tres módulos. Respecto al módulo 1, de Evaluación Preliminar se puede mencionar:

- Se consideran características generales con el fin de analizar de manera sencilla y rápida el estado actual de cada depósito de relaves.
- Si bien la evaluación propuesta es estricta al momento de decidir si pasar al módulo de parámetros críticos o no, se entiende que la presencia de algún factor agravante puede gatillar una falla del depósito si no se aplican las medidas correctivas adecuadas.

En relación con la revisión de parámetros críticos, este trabajo identificó 29 parámetros, de los cuales 5 fueron definidos por normativas, 18 se obtuvieron a partir de condiciones de diseño, y 6 no presentan ningún tipo de regulación en Chile. Respecto a los umbrales, para los primeros 5 parámetros se exigen valores mediante las normas, mientras que los parámetros restantes tienen umbrales definidos por cada empresa.

Por último, sobre la determinación del índice de estabilidad física, se puede comentar lo siguiente:

- Se desarrollaron árboles de falla, pues corresponde a una herramienta capaz de representar las causas y sus efectos en la generación de las fallas.

- Se plantea el uso de probabilidades en la ocurrencia de eventos para cuantificar la posibilidad de falla y poder clasificarla y asignarle un índice de estabilidad. Estas probabilidades pueden ser determinadas por data histórica o por criterio de expertos. El uso de uno u otro tendrá efectos sobre los resultados obtenidos.

Por otra parte, la realización de un análisis de sensibilidad permite, en términos generales, determinar si el Árbol de Falla representa lo que se ha observado en la práctica profesional. De esta forma, es posible ajustar su estructura o los valores de probabilidad de cada causa raíz, con el fin de que el Árbol de Falla sea capaz de representar el efecto que tiene un cambio en algún parámetro representado mediante alguna causa raíz.

Así, para el mecanismo de falla de inestabilidad de taludes, las causas raíces más importantes corresponden a los factores de seguridad, para erosión interna, una red de flujo desfavorable tiene mayor efecto en el resultado del árbol de falla, mientras que, para el caso de rebalse, la causa raíz con mayor impacto sobre el resultado corresponde a la laguna cerca del muro.

En relación con la metodología propuesta, se entiende que este trabajo constituye un primer paso y que, si bien tiene asociadas incertidumbres significativas, se sientan bases de procedimiento e interpretación. Además, su estructura permite la incorporación de análisis de riesgo.

Esta metodología es un aporte importante a las herramientas que se utilizan en la actualidad, ya que incluye parámetros y eventos que no se evalúan actualmente en los depósitos. En este sentido, esta metodología permite llenar vacíos normativos relacionados con variables que no se miden y que esta herramienta si plantea monitorear.

Además, corresponde a una herramienta preventiva, en el sentido de que obliga a estudiar los parámetros críticos y causas raíces de cada árbol de falla, lo que podría ayudar en la detección de fallas o errores que no se habrían detectado con los estudios actuales.

Por último, si bien la metodología propuesta corresponde a un primer acercamiento con la evaluación de la estabilidad física de un depósito de relaves, se considera un primer paso en el desarrollo de herramientas que permitan acercar la información relacionada con la estabilidad de depósitos de relaves a las comunidades, quienes son los principales afectados en caso de ocurrencia de accidentes. En función de esto, esta herramienta plantea una mejora en términos sociales, técnicos y medioambientales, siendo un primer paso para la optimización del análisis de la condición de estabilidad de depósitos de relave en Chile.

8 Recomendaciones

Como recomendaciones para el trabajo futuro, se puede mencionar lo siguiente:

- En términos generales, se recomienda considerar un mejoramiento continuo de la metodología planteada, reevaluando cada módulo tanto en etapa de calibración, como de puesta en marcha y aplicación.
- Identificar aquellos parámetros críticos que tienen importancia sobre los otros. Esto permitiría definir la cantidad de parámetros fuera de rango que indican que el depósito está en riesgo de falla.
- Definir distintos escenarios que permitan calibrar la metodología completa, en particular su último módulo. Mediante la definición de casos será posible modificar los árboles de falla para que logren considerar todas las combinaciones de eventos y parámetros fuera de rango que se puedan dar.
- Respecto a la evaluación numérica del índice, se sugiere definir coeficientes α y β distintos para cada causa raíz, que representen el estado de cada parámetro, permitiendo la asignación de diferentes probabilidades. Se recomienda también, en lugar de utilizar probabilidades, asignar valores, por ejemplo, entre 0 y 1, y comparar los resultados obtenidos. El objetivo de esto es elegir la calificación apropiada, considerando que el resultado debe ser de fácil comprensión para autoridades mineras y comunidades.
- Sobre el punto anterior, se sugiere también considerar la evaluación de un caso base, y utilizar las variaciones que el índice puede tener debido al cambio en alguna variable o causa raíz. Esto permitiría definir los límites entre los tres índices en función del cambio generado y no a un valor fijo, el cual puede variar de acuerdo con la configuración de cada depósito.
- Se sugiere definir un estado base de estabilidad y hacer el análisis con las tendencias que presenta cada parámetro o causa raíz en el depósito.
- Siguiendo con los árboles de falla, se recomienda asociar las distribuciones de probabilidad obtenidas, a distribuciones conocidas, con el fin de determinar sus parámetros estadísticos. Así, puede ser posible definir umbrales en función de la esperanza y la varianza de cada distribución. Además, estos parámetros permiten ver de mejor forma la sensibilidad del árbol de falla ante los cambios en algún evento raíz.
- En relación con la definición de protocolos, se recomienda considerar como base, los manuales de emergencia que cada minera presenta. Además, es importante distinguir entre las fallas que pueden ser remediadas y las que no.

9 Bibliografía

- Advanced Mining Technology Center. (2017). *Estado del Arte sobre la Estabilidad Física de los Depósitos de Relaves*. Santiago.
- AECOM. (2009). *Root Cause Analysis of TVA Kingston Dredge Pond Failure on December 22, 2008*. Harriman.
- AMEC. (2003). Descripción del Proyecto - Yamana Gold Minera Florida Ltda., 1–63.
- Anglo American. (2016). Procedimiento de Acciones ante Emergencias en el Tranque de Relaves Las Tórtolas. División Los Bronces, Chile.
- Antofagasta Minerals - Los Pelambres. (2015). Tranque de relaves El Mauro.
- Arcadis Geotecnia. (2004). *Estudio de Impacto Ambiental: Proyecto de Ampliación del Tranque de Relaves El Torito*.
- Arcadis. (2010). Instrumentación Geotécnica Depósito La Brea. Santiago: Lumina Copper Chile S.A.
- Arcadis. (2014). Manual de Emergencia Depósito de Relaves Mauro. Santiago: Minera los Pelambres.
- Baia Mare Task Force. (2000). *Report of the International Task Force for Assessing the Baia Mare Accident. Sustainable Development*.
- Cantallopts, J. (2016). *Importancia y oportunidades de la minería en Chile en el escenario global. Conferencia Internacional de Minería, CONFEMIN*.
- Carvajal, C., & Pacheco, A. (2004). *Diagnóstico de la Situación Actual de Tranques de Relaves de la V Región*. Universidad Católica de Valparaíso.
- Chambers, D. M. (2015). A Review of the “Report on Mount Polley Tailings Storage Facility Breach, Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel.” Center for Science in Public Participation.
- Chief Inspector of Mines. (2015). *Mount Polley Mine Tailings storage facility breach*. British Columbia, Canadá.
- COEMIN S.A. (2008). EIA Depósito de Relaves en Pasta Sector 5, *Capítulo I*.
- COEMIN S.A. (2011). *Sistema de Monitoreo y Control - Depósito de Relaves en Pasta Sector nº5*.
- COEMIN S.A. (2011). Disposición Sistema de Monitoreo - Depósito de Relaves en Pasta Sector nº5.
- Compañía Minera San Gerónimo. (2010). Estudio de Impacto Ambiental “Tranque de Relaves Humo Corral,” (Capítulo III).
- Conejera, C. (2016). *Efecto de la Fábrica y la Estructura en la Resistencia No Drenada de Relave Integral*. Universidad de Chile.

- Consejo Minero. (2015). *Minería en Números*.
- de la Cruz, S. (2017). *Evaluación del Fallo de Presas de Relaves con el Método del Árbol de Fallos*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Department of Geodesy and Surveying. (2011). *The Kolontár Report*. Budapest.
- Falcón, M. F., & Urbano, S. (2016). Situación actual de los Depósitos de Relaves en Chile y Exigencias Legales en Pro de la Seguridad de los Depósitos. Santiago: SERNAGEOMIN.
- Fell, R., & Fry, J.-J. (2007). The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations. *Internal Erosion of Dams and Their Foundations: Selected and Reviewed Papers from the Workshop on Internal Erosion and Piping of Dams and Their Foundations*, 1–23.
- Fell, R., Wan, C. F., Cyganiewicz, J., & Foster, M. (2003). Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(4), 307–314.
- Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000). A Method for Assessing the Relative Likelihood of Failure of Embankment Dams by Piping. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 497–500.
- Fundación Chile. (2016). *Roadmap Tecnológico 2015-2035: Desde el cobre a la innovación*.
- Fundación Chile, & CORFO. (2015). Hoja de Ruta de la Minería 2035.
- Golder Associates, S. (2008). Manual de Evaluación de Riesgos de Faenas Mineras Abandonadas o Paralizadas (FMA/P),
- IST Ingenieros Ltda. (2005). *Informe Final de Ingeniería Básica Proyecto Tanque de Relaves Adosado Minera Florida S.A. Planta Alhué*.
- Knight, Z. (2015). *Slope Stability Analysis of Tailings Dam Embankments*. Charles Darwin University.
- Mine Safety and Health Administration MSHA. (2010). Engineering and Design Manual - Coal Refuse Disposal Facilities.
- Ministerio del Medio Ambiente. Decreto 40: Aprueba Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (2014). Chile.
- Ministerio de Minería de Chile. (2007). Decreto Supremo N° 248: Reglamento para la aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves, 159–182.
- Ministerio de Minería de Chile. (2012). Decreto 41: Aprueba Reglamento de la Ley de Cierre, de Faenas e Instalaciones Mineras.

- Ministerio de Minería de Chile. (2012). Ley 20.551: Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras.
- Ministerio de Obras Públicas. (2015). Decreto 50.
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Ley 19.300: Aprueba Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente (2016). Chile.
- Morgenstern, N. R., Vick, S. G., Viotti, C. B., & Watts, B. D. (2016). *Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam*.
- National Secretariat for Social Action. (2012). *The Philex Mine Tailings Spill of 2012: An Independent Fact-finding Mission Report*. Nassa.
- Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. (2017). *Proyecto INNOVA 15BP-45433 “Desarrollo de herramientas de evaluación y criterios técnicos para asegurar la estabilidad física de instalaciones remanentes, en el marco de la Ley 20.551 Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras.”* Valparaíso.
- Sanhueza, C., & Rodríguez, L. (2013). Análisis Comparativo de Métodos de Cálculo de Estabilidad de Taludes Finitos aplicados a Laderas Naturales. *Revista de La Construcción*, 12(1), 17–29.
- SERNAGEOMIN. (2006). Formulario E700 para Informe Semestral sobre Operación y Mantención de Depósitos de Relaves.
- SERNAGEOMIN. (2015). Preguntas Frecuentes sobre Relaves.
- SERNAGEOMIN. (2016). Catastro de Depósito de Relaves 2016,
- Sociedad Punta del Cobre S.A. (2010). Declaración de Impacto Ambiental (DIA) - Proyecto Depósito de Relaves Las Cruces N° 2,
- Taguchi, G. (2014). *Fault Tree Analysis of Slurry and Dewatered Tailings Management – a Framework*. University of British Columbia.
- U.S. Bureau of Reclamation. (1999). A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure. *Sedimentation & River Hydraulics*, (September),
- Zhang, L., Peng, M., Chang, D., & Xu, Y. (2016). *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment* (First). Singapore: John Wiley & Sons.

10 Anexos

10.1 Normativa nacional, internacional y buenas prácticas.

Tabla 10.1. Leyes, reglamentos y normas nacionales e internacional

Título o Nombre de Leyes, Reglamentos o Normas	Año	País	Institución
Mining Act	2016	Australia	Government of Western Australia. Department of Mines and Petroleum
Mines Safety and Inspection Act	2016	Australia	Government of Western Australia. Department of Mines and Petroleum
Environmental Protection Act	2016	Australia	Government of Western Australia. Department of Mines and Petroleum
The Rights in Water and Irrigation Act	2002	Australia	Government of Western Australia. Department of Mines and Petroleum
Decreto Supremo n°132: Reglamento de Seguridad Minera	2004	Chile	SERNAGEOMIN Ministerio de Minería
Decreto Supremo n°248: Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves	2007	Chile	SERNAGEOMIN Ministerio de Minería
Ley n°19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente	2011	Chile	Ministerio de Minería
Decreto 41: Aprueba reglamento de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras.	2012	Chile	SERNAGEOMIN Ministerio de Minería
Ley 20.551: Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras	2015	Chile	Ministerio de Minería
Decreto 50	2015	Chile	Ministerio de Obras Públicas
Ley 20.819: Modifica la ley 20.551 que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras e introduce otras modificaciones legales	2015	Chile	Ministerio de Minería
Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração (NBR 13028)	1993	Brasil	ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Título o Nombre de Leyes, Reglamentos o Normas	Año	País	Institución
Lei Federal nº12.334: Política Nacional de Segurança de Barragens	2010	Brasil	IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração
Lei Federal nº12.305: Política Nacional de Resíduos Sólidos	2010	Brasil	IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração
Resolução CNRH nº143: Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco e dano potencial associado	2012	Brasil	CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos
Resolução CNRH nº144: Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens	2012	Brasil	CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos
Portaria DNPM nº 416: Cadastro das Barragens de Mineração; Classificação das Barragens Cadastradas; Estrutura e Conteúdo do Plano de Segurança; Revisão do Plano de Segurança; Inspeções Periódicas; Da Qualificação da Equipe Responsável	2012	Brasil	DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
Portaria DNPM 526: Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM)	2013	Brasil	DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería	2016	Perú	Ministerio de Energía y Minas
Real Decreto 863/1985: Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.	1985	España	Ministerio de Industria y Energía
Association of State Dam Safety (ASDSO) Summary of Officials State Laws and Regulations on Dam Safety	2000	Estados Unidos	ASDSO - Association of State Dam Safety
Safety of Dams – Policy and Procedures	2014	Estados Unidos	US Army Corps of Engineers
The National Dam Safety Program	2016	Estados Unidos	FEMA – Federal Emergency Management Agency
Summary of State Laws and Regulations on Dam Safety	2000	Estados Unidos	Association of State Dam Safety Officials
Health, Safety and Reclamation Code for Mines in British Columbia Ministry of Energy and Mines Victoria, British Columbia 2017	2017	Canadá	Ministry of Energy and Mines
British Columbia Water Act [RSBC 1996] chapter 483	2009	Canadá	
Law of the People’s Republic of China on Prevention and Control of Environmental Pollution by Solid Waste	2004	China	Standing Committee of the Eighth National People’s Congress

Título o Nombre de Leyes, Reglamentos o Normas	Año	País	Institución
Law of the People's Republic of China on Prevention and Control of Water Pollution	1996	China	Standing Committee of the Eighth National People's Congress
Law of the People's Republic of China on Protecting Against and Mitigating Earthquake Disasters	1997	China	Standing Committee of the Eighth National People's Congress

Tabla 10.2. Guías y Buenas Prácticas Nacionales e Internacional.

Título o Nombre de Guías o Buenas Prácticas	Año	País	Institución
Guía de las Buenas Prácticas en Seguridad Minera en la Pequeña Minería	2002	Chile	SONAMI – Sociedad Nacional de Minería
Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves.	2007	Chile	SERNAGEOMIN – Servicio Nacional de Geología y Minería
Guía Metodológica para la Presentación de Planes de Cierre sometidos al Procedimiento de Aplicación General. Res Exenta n° 0598	2014	Chile	SERNAGEOMIN – Servicio Nacional de Geología y Minería
Guía Metodológica de Evaluación de Riesgos para el Cierre de Faenas Mineras. Res Exenta n° 0598	2014	Chile	SERNAGEOMIN – Servicio Nacional de Geología y Minería
Depósitos de Lodos en Procesos de Tratamiento de Industrias Extractivas. Instrucción técnica complementaria (ITC).	2001	España	Ministerio de Industria y Energía
Seepage Analysis and Control for Dams	1993	Estados Unidos	US Army Corps of Engineers
Design and Evaluation of Tailings Dams	1994	Estados Unidos	US Environmental Protection Agency
Construction Control for Earth and Rock-Fill Dams	1995	Estados Unidos	ASCE- American Society of Civil Engineers
Instrumentation of Embankment Dams and Levees	1995	Estados Unidos	ASCE- American Society of Civil Engineers
Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigation	1997	Estados Unidos	ASCE- American Society of Civil Engineers
Federal Guidelines for Dam Safety. Hazard Potential Classification System for Dams. Interagency Committee on Dam Safety.	2004	Estados Unidos	FEMA – Federal Emergency Management Agency

Título o Nombre de Guías o Buenas Prácticas	Año	País	Institución
Guidelines for Cooperation with the Alaska Dam Safety Program	2005	Estados Unidos	Alaska Department of Natural Resources
Engineering and Design Manual: Coal Refuse Disposal Facilities	2010	Estados Unidos	MSHA – Mine Safety and Health Administration
Safety guidelines and good practices for tailings management facilities	2014	Europa	UNECE – United Nations Economic Commission for Europe
Dams less than 30 m high – Cost savings and safety improvements. Bulletin nº 109	1997	ICOLD	International Commission on Large Dams
Manual on Tailings Dams and Dumps. Bulletin nº 45	1997	ICOLD	International Commission on Large Dams
Tailings Dams: Risk of Dangerous Occurrences. Bulletin 121	2001	ICOLD	International Commission on Large Dams
Sustainable Design and Post-Closure Performance of Tailings Dams. Bulletin nº 153	2013	ICOLD	International Commission on Large Dams
Small Dams, Design, Surveillance and Rehabilitation. Bulletin nº 157	2016	ICOLD	International Commission on Large Dams
Selecting Seismic Parameters for Large Dams. Guidelines. Bulletin nº 148	2016	ICOLD	International Commission on Large Dams
Buenas prácticas de preparación y respuesta ante emergencias (ICMM)	2005	Reino Unido	ICMM – Consejo Internacional de Minería y Metales
Planning for Integrated Mine Closure: Toolkit (ICMM)	2008	Reino Unido	ICMM – Consejo Internacional de Minería y Metales
Review of Tailings Management Guidelines and Recommendations for Improvement	2016	Reino Unido	ICMM – Consejo Internacional de Minería y Metales
Guidelines on Tailings Dam Design, Construction and Operation	1999	Australia	ANCOLD – Australian National Committee on Large Dams
Guidelines on the Safe Design and Operating Standards for Tailings Storage	1999	Australia	Western Australia. Department of Minerals and Energy
Tailings Storage Facilities in Western Australia: Code of Practice	2013	Australia	Western Australia. Government of Mines and Petroleum
Tailings Dam Audit – Guide	2015	Australia	Western Australia. Government of Mines and Petroleum

Título o Nombre de Guías o Buenas Prácticas	Año	País	Institución
Strategic Framework for Mine Closure	2000	Australia y Nueva Zelanda	Australian and New Zealand Minerals and Energy Council
Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities	2011	Canadá	The Mining Association of Canada
A Guide to the Management of Tailings Facilities	2011	Canadá	The Mining Association of Canada
Wolverine Project, Tailings Facility: Operation, Maintenance and Surveillance Manual	2010	Canadá	Yukon Zinc Corporation
Bulletin Technique: Application des Recommandations de Sécurité des Barrages aux Barrages Miniers	2014	Canadá	CDA – Canadian Dam Association

10.2 Clasificación de estabilidad (Etapa 2, Proyecto INNOVA 15BP-45433)

Tabla 10.3. Puntuación según geometría del depósito (PUCV, 2017)

	Rangos de Medición			
	< 50.000 (0)	50.000 – 1.500.000 (100)	1.500.000 – 60.000.000 (200)	> 60.000.000 (400)
Volumen Total [m ³]	< 50.000 (0)	50.000 – 1.500.000 (100)	1.500.000 – 60.000.000 (200)	> 60.000.000 (400)
Altura Total [m]	< 5 (0)	5 – 15 (100)	15 – 30 (200)	> 30 (400)
Pendiente Global [°]	< 18 (0)	18 – 30 (100)	> 30 (200)	
Revancha [m]	> 1 (0)	< 1 (200)		

Tabla 10.4. Calificación según tipo de depósito y método constructivo

Condición	Calificación	Evaluación
Tranques de arenas de relaves aguas abajo, embalses, relaves filtrados, relaves espesado, en pasta	0	Favorable
Tranques de arena de relaves y embalses eje central	100	Intermedio
Tranques de arena de relaves aguas arriba	200	Desfavorable

Tabla 10.5. Calificación según nivel de compactación (PUCV, 2017)

Condición	Calificación	Evaluación
Nivel de compactación sí cumple con lo especificado en proyecto de diseño, en todas las etapas de construcción	0	Adecuada

Nivel de compactación cumple con lo especificado en proyecto de diseño, con al menos un 50% de las etapas de construcción	100	Intermedio
Nivel de compactación no cumple con lo especificado en proyecto de diseño, no cumple en ninguna etapa de construcción	200	Inadecuada

Tabla 10.6. Calificación según calidad de las arenas (PUCV, 2017)

Condición	Calificación	Evaluación
Porcentaje de finos inferior al 20%	0	Adecuada
Porcentaje de finos superior al 20%	200	Inadecuada

Tabla 10.7. Calificación según grado de implementación de obras y acciones (PUCV, 2017)

Condición	Calificación	Evaluación
Implementación de las obras y acciones indicadas en el proyecto de diseño	0	Adecuada
Sin la implementación de las obras y acciones indicadas en el proyecto de diseño	200	Inadecuada

Tabla 10.8. Calificación según nivel piezométrico (PUCV, 2017)

Condición	Calificación	Evaluación
Sí cumple con lo establecido en la etapa de cierre, según proyecto de diseño	0	Favorable
No cumple con lo establecido en la etapa de cierre, según proyecto de diseño	200	Desfavorable

Tabla 10.9. Calificación según caracterización del suelo de fundación (PUCV, 2017)

Condición	Calificación	Evaluación
Antecedentes topográficos, hidrogeológicos, geológicos y geotécnicos	0	Adecuada
Antecedentes geológicos y topográficos	100	Intermedio
Sin antecedentes	200	Inadecuada

Condición	Calificación	Evaluación
Registros con acelerómetros en el sector de emplazamiento y/o en el depósito	0	Muy adecuada
Evaluación de riesgo sísmico	100	Adecuada
Empleo de la zonificación sísmica de Chile	200	Intermedio
Sin antecedentes	300	Inadecuada