



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

**PROPUESTA METODOLÓGICA DE INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO PARA
EVALUAR LA ESTABILIDAD FÍSICA DE UN DEPÓSITO DE RELAVES
ABANDONADO EN CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

ALONDRA MACARENA FLORES BARRENECHEA

PROFESOR GUÍA
ROBERTO ENRIQUE GESCHE SCHÜLER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
CÉSAR PASTÉN PUCHI
MARCELO GARCÍA GODOY

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: Ingeniera Civil mención
Estructuras y Construcción
POR: Alondra Macarena Flores Barrenechea
FECHA: /09/2019
PROFESOR GUIA: Roberto Gesche Schüler

PROPUESTA METODOLÓGICA DE INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO PARA EVALUAR LA ESTABILIDAD FÍSICA DE UN DEPÓSITO DE RELAVES ABANDONADO EN CHILE

El presente trabajo tiene por objetivo principal proponer una metodología que permita elegir la instrumentación para monitorear la estabilidad física de los depósitos de relaves abandonados en Chile. En primer lugar, se hace una revisión de antecedentes de los componentes que caracterizan a un depósito de relaves, junto a las diferentes formas de clasificarlos. En segundo lugar, se indagan las definiciones de estabilidad física, los mecanismos de falla y los eventos gatilladores que provocan los incidentes de pérdida de estabilidad física en el mundo. Posterior a esto, se revisa la normativa y manuales de buenas prácticas chilenas y extranjeras. Por otra parte, se revisan los sistemas de instrumentación y tecnologías utilizados para monitorear los parámetros críticos revisados. Junto a la instrumentación no invasiva remota, también se estudian los ensayos de laboratorio y terreno más usuales. Además, se describen estudios de entorno regional relevantes para esta propuesta.

Se revisa el estado de los depósitos de relaves abandonados en Chile mediante el estudio del Catastro de Depósitos de Relaves del SERNAGEOMIN (2019) y se complementa con información obtenida mediante el programa ArcMap.

Del trabajo anterior se infiere la poca información existente relativa a depósitos de relaves abandonados en Chile. Aparentemente, ninguno cuenta con un sistema de monitoreo que permita establecer su estado actual o posterior a un evento que afecte su estabilidad física. Se identifica la necesidad de proponer una metodología que sea capaz de determinar el nivel de instrumentación necesaria para monitorear la estabilidad física de los depósitos de relaves abandonados, entendiendo su situación de abandono y falta de información respecto su construcción y operación.

La metodología propuesta consta de cinco etapas y tres categorizaciones, que conducen a propuestas de monitoreo. Las tres primeras etapas se realizan en gabinete y consisten en recopilar información disponible, establecer el estado actual y obtener tendencias de deformaciones del depósito de relaves abandonado, respectivamente. Dependiendo del resultado de la primera categorización, se puede asignar un monitoreo básico o continuar los estudios mediante una visita a terreno para realizar exploraciones geofísicas e instalar monolitos para monitoreo remoto. Se realiza una nueva categorización del depósito, al cual se le puede asignar un monitoreo intermedio o continuar los estudios mediante exploraciones geotécnicas tradicionales. Finalmente, se obtiene una última categorización, que conduce a un monitoreo intermedio, más intensivo que el anterior, o a un monitoreo complejo, que exige visitas a terreno anuales. Éstas últimas dos propuestas de monitoreo, incluyen revisiones frente a eventos naturales extremos (lluvias y sismos). Las herramientas sugeridas para la aplicación se describen en otro apartado. Por último, la primera etapa de la metodología propuesta se aplica a tres depósitos de relaves abandonados chilenos y, finalmente, se sugiere su aplicación a todos los depósitos de relaves abandonados en Chile.

Dedicatoria

“Con la ilusión del primer día y la emoción de la última noche”

“Día y noche”, Liricistas. 2016

“Porque el mañana de ayer es hoy”

“Como pasa el tiempo”, El cuarteto de Nos. 2014

Agradecimientos

A mis papás, Lorena y Paulo, por todo lo que han hecho por mí. Por las historias enredadas de mi papá y por como mi mamá siempre me muestra otra forma de ver y hacer las cosas. A mi hermana Almendra por las conversaciones hasta tarde y por despertarme al día siguiente para ir a la U.

A mi profesor guía Roberto Gesche, por mostrarme la geotecnia y enseñarme que todo tiene un porqué. Gracias por la paciencia.

A mi familia: a mi tata, mi abuelita; mis tíos, Gerardo, Maya, María Luisa; mis primas Krasna y Alemka y primos Neven y Davor. A la familia Vicuña, la mejor familia postiza que alguien podría tener. A Elsa, por todos estos años de amor.

A mis amig@s del colegio. Al Pelao por esa amistad única desde el colegio, cuando peleábamos por que invadía mi puesto en básica y perreos que nos mandamos en la cancha de la U. A la Anto, por esas conversaciones infinitas afuera de los chinos de la Alcaldesa y por todo lo que hemos compartido.

A mis amigos de campamento: Exe y Tata.

Al deporte en general, en especial al futbol, por todo lo que me ha entregado. Por los valores, las frustraciones, los triunfos y los fracasos, las amigas y compañeras de equipo... A mis equipos del colegio y las amigas que ahí hice. Al equipo de volley FCFM durante mis primeros años en la U. A ExTEI, que hermoso que es jugar con ustedes cabras lindas <3. A las civiles deportistas de La Mona, cómo alegraron mi vida en la U. Y una gran, especial y cariñosa mención a las de iiiiingeniería, que me vieron crecer como persona y futbolista, que me dieron el espacio de probar cosas nuevas, de jugar como siempre quise jugar, por dejarme capitanearlas y por levantar las copas ese hermoso año 2018. ¡Las quiero a todas!

A mis amigos de la U. A la sección 4: Vale, Gonza, MatiPGx2, Cami V., Italo. A los civiles con pera: Lucho, Daslav, Coni, Nachito, Hans, Pablito, Claudio, Felo. A la Pame, Mariale y Sol, las mejores civiles que pude conocer. A la Generación Dorada del futbol: Rosa, Marga, Isi, Gocho, Paz; que lindo entrenar y carretear con ustedes. A los grupos de trabajo: CEI 2016 y CDI 2018, por todo lo que hicimos, lo que aprendí, lo que disfruté las actividades que organizamos. A las Geopeceras 2018 y 2019, por las constantes sacadas de vuelta, juegos de cartas, pelambres, webeos a la Susi, los callaita, los cachos, revoltijos y tantas más... A los Toyoura-San por hacerme sentir parte. Al Beto por el manso campeonato que nos sacamos.

A las funcionarias de la U: Asu, Carmencita, Mariela, Fabiola y tía Isabel. A mis entrenadores de la U: René, Hugo, Aguayo y Ale.

A Seba, por el cariño que en tan poco tiempo hemos logrado cultivar, por cuidarme, quererme y sacarme pa' delante.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos.....	1
1.1.1. Objetivo General.....	1
1.1.2. Objetivos Específicos	1
1.2. Estructuración del trabajo.....	2
2. Revisión de Antecedentes	3
2.1. Relave y depósitos de relaves.....	3
2.2. Tipos de depósitos de relave	4
2.2.1. Tipo de relave.....	5
2.2.2. Tipo de depositación.....	6
2.2.3. Método constructivo.....	7
2.3. Estabilidad física de depósitos de relaves	8
2.4. Incidentes reportados a nivel mundial y nacional	9
2.4.1. Incidentes a nivel mundial.....	9
2.4.2. Incidentes a nivel nacional.....	11
2.4.3. Último incidente reportado	11
2.5. Mecanismos de falla	12
2.5.1. Licuación sísmica	12
2.5.2. Inestabilidad de taludes	13
2.5.3. Rebalse (overtopping)	14
2.5.4. Deformaciones sísmicamente inducidas.....	15
2.5.5. Erosión interna (piping).....	15
2.5.6. Licuación estática	16
2.5.7. Inestabilidad del suelo de fundación	16
2.6. Eventos gatilladores y parámetros críticos	16
2.7. Antecedentes normativos y Buenas Prácticas en Chile y el Mundo	20
2.7.1. Chile	20
2.7.2. Perú.....	23
2.7.3. Australia	25
2.7.4. Estados Unidos	27

2.7.5.	Canadá.....	29
2.7.6.	Organismos Internacionales	30
2.7.7.	Análisis sobre Antecedentes normativos y buenas prácticas	32
2.8.	Instrumentos utilizados en depósitos de relaves	33
2.8.1.	Instrumentación no invasiva	33
2.8.1.1.	Imágenes satelitales	33
2.8.1.2.	Interferometría.....	34
2.8.1.3.	Modelos de elevación digital (DEM)	35
2.9.	Estudios de entorno regional.....	36
2.9.1.	Estudio de Riesgo Sísmico	37
2.9.2.	Estudio Hidrológico.....	38
2.9.3.	Análisis de estabilidad de taludes	38
2.10.	Criterios utilizados en la propuesta metodológica	40
2.10.1.	Tipología de depósitos de relaves	40
2.10.2.	Envejecimiento de arenas	43
2.10.3.	Distancia a fallas geológicas	44
2.10.4.	Actividad sísmica.....	45
2.10.5.	Exposición a crecidas.....	45
2.10.6.	Volcanismo.....	45
2.11.	Recursos computacionales	46
2.11.1.	ArcMap 10.5.....	46
2.11.1.1.	Ubicación.....	46
2.11.1.2.	Áreas y observación general	47
2.11.1.3.	Distancias.....	47
2.12.	Conclusiones generales de la revisión de antecedentes	47
3.	Clasificación de depósitos de relaves abandonados en Chile	50
3.1.	Distribución por región	50
3.2.	Distribución según tipo de depositación y método constructivo	50
3.3.	Distribución según recurso.....	51
3.4.	Presencia de muro, derrames y ubicación en grupos.....	52
3.5.	Distribución según volumen, tonelaje y área	54

3.6.	Distribución según alturas inferidas.....	56
3.7.	Distribución según distancias a puntos y áreas de interés	57
3.7.1.	Distancias a centros poblados	59
3.7.2.	Distancias a cuerpos de agua.....	59
3.7.3.	Distancias a zonas de interés	59
3.7.4.	Distancias a volcanes activos	59
3.8.	Análisis del Catastro de Depósitos de Relaves Abandonados	61
4.	Propuesta metodológica de instrumentación y monitoreo para un depósito de relaves abandonado en Chile	63
4.1.	Etapa 1: Input (E1)	65
4.2.	Etapa 2: Línea de base (E2)	70
4.3.	Etapa 3: Tendencias de deformaciones verticales y horizontales (E3)	71
4.3.1.	Mecanismos de falla relevantes (MFR).....	71
4.4.	Categorización de la Etapa 3 (C-E3).....	73
4.5.	Monitoreo Simple (MS)	74
4.6.	Etapa 4: Campaña en terreno preliminar (no invasiva e invasiva somera) (E4).....	75
4.6.1.	Actualización de MFR posterior a Etapa 4	77
4.7.	Categorización de la Etapa 4 (C-E4).....	78
4.8.	Monitoreo Intermedio post Etapa 4 (MI4)	80
4.9.	Etapa 5: Campaña geotécnica invasiva e instrumentación invasiva (E5)	81
4.9.1.	Campaña en terreno.....	81
4.9.2.	Instalación de instrumentos	81
4.9.3.	Campaña en laboratorio y trabajo en gabinete	83
4.9.4.	Actualización de MFR posterior a Etapa 5	84
4.10.	Categorización de la Etapa 5 (C-E5).....	85
4.11.	Monitoreo Intermedio post Etapa 5 (MI5)	86
4.12.	Monitoreo Complejo (MC)	87
4.13.	Revisión posterior a eventos extremos	88
5.	Instrumentos a utilizar	90
5.1.	Etapa 1	90
5.2.	Etapa 2	90

5.3. Etapa 3	91
5.4. Etapa 4	91
5.5. Etapa 5	92
6. Aplicación de la Propuesta Metodológica.....	93
6.1. Elección de depósitos	93
6.2. Resultados de aplicación de Etapa 1	93
6.3. Análisis de resultados	97
7. Análisis y Discusión	99
8. Conclusiones	102
9. Recomendaciones	104
9.1. Ampliación de la Propuesta Metodológica a todos los depósitos de relaves abandonados en Chile.....	104
9.2. Otras recomendaciones	106
10. Glosario de siglas	108
11. Bibliografía	109
Anexo A: Accidentes de depósitos de relaves abandonados reportados a nivel mundial	118
Anexo B: Catastro de Depósitos de Relaves Abandonados en Chile	123
Anexo C: Propuesta de instrumentación invasiva	132
Anexo D: Propuesta de ensayos de terreno	137

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Eventos gatilladores y parámetros críticos para el mecanismo de falla de Rebalse (Fundacion Chile, 2017).....	17
Tabla 2.2 Eventos gatilladores y parámetros críticos para el mecanismo de falla de Erosión interna (Fundacion Chile, 2017).	18
Tabla 2.3 Eventos gatilladores y parámetros críticos para el mecanismo de falla de Inestabilidad de taludes (Fundacion Chile, 2017).	18
Tabla 2.4 Grupos y factores asociados a mecanismos de fallas de un depósito de relave abandonado. (Adaptado de SERNAGEOMIN, 2018b)	19
Tabla 2.5 Recomendaciones de monitoreo (MINEM, 1998)	25
Tabla 2.6 Mejores técnicas disponibles sugeridas para el monitoreo de estabilidad de depósitos de relaves (Adaptado de EC, 2004)	31
Tabla 2.7 Variables a monitorear y sistemas de instrumentacion reiterados en la literatura (Elaboracion propia).....	32
Tabla 2.8 Análisis convencionales en el diseño de taludes (Escobar y Duque, 2016) ...	39
Tabla 2.9 Fragmento de Matriz de evaluación de riesgo sísmico (peligrosidad) (Modificado de Mardones y Vidal, 2001)	44
Tabla 2.10 Rango y Porcentaje para Distancia de la traza(s) de la falla(s) con respecto a la unidad de análisis (Modificado de Muñoz, 2013).....	45
Tabla 3.1 Distribución de depósitos abandonados por región (SERNAGEOMIN, 2019a)	50
Tabla 3.2 Distribución según tipo de depositación y método constructivo (SERNAGEOMIN, 2019a)	51
Tabla 3.3 Distribución según tipo de recurso (SERNAGEOMIN, 2019A).....	51
Tabla 3.4 Volumen actual de depósitos de relaves abandonados (SERNAGEOMIN, 2019a).....	54
Tabla 3.5 Depósitos de relaves abandonados en Chile con áreas superiores a 5 hectáreas (Elaboración propia).....	55
Tabla 3.6 Nombre y descripción de capas (Albers, 2012; IDE, 2019).....	57
Tabla 4.1 Puntajes para cada categoría.....	66
Tabla 4.2 Propuesta de categorías según Tipo de tranque.	67
Tabla 4.3 Propuesta de categorías según Edad del depósito.....	67
Tabla 4.4 Propuesta de categorías según Método Constructivo.....	67
Tabla 4.5 Propuesta de categorías según Cercanía a puntos de interés.....	67
Tabla 4.6 Categoría general para Cercanía a puntos de interés	68

Tabla 4.7 Propuesta de distribución de categorías según Altura inferida	68
Tabla 4.8 Propuesta de distribución de categorías según distancia a Fallas geológicas	68
Tabla 4.9 Propuesta de distribución de categorías según Actividad Sísmica	69
Tabla 4.10 Propuesta de distribución de categorías según Exposición a crecidas y escorrentías	69
Tabla 4.11 Propuesta de distribución de categorías según Actividad volcánica	69
Tabla 4.12 Ponderadores para criterios de Etapa 1.	70
Tabla 4.13 Parámetros críticos asociados a mecanismos de falla relevantes en depósitos de relave abandonados (Elaboración propia).	72
Tabla 4.14 Preguntas para determinar mecanismos de falla relevantes para un depósito de relaves abandonado posterior a Etapa 3 (Elaboración propia).	73
Tabla 4.15 Campaña en terreno a realizar en Etapa 4.	77
Tabla 4.16 Parámetros críticos asociados a mecanismos de falla relevantes en depósitos de relave abandonados (Elaboración propia).	78
Tabla 4.17 Preguntas para actualizar los mecanismos de falla relevantes en el depósito de relaves abandonado en la Etapa 4 (Elaboración propia).	78
Tabla 4.18 Propuesta de exploraciones en terreno para Etapa 5	81
Tabla 4.19 Propuesta de monitoreo de un depósito de relaves abandonado para Etapa 5	82
Tabla 4.20 Descripción de campaña en laboratorio y trabajo de gabinete de Etapa 5. .	83
Tabla 4.21 Parámetros críticos asociados a mecanismos de falla relevantes en depósitos de relave abandonados.	84
Tabla 4.22 Preguntas para actualizar los mecanismos de falla relevantes en el depósito de relaves abandonado en la Etapa 4.	85
Tabla 6.1 Depósitos de relaves abandonados en Chile escogidos para la aplicación de la Etapa 1 de la Propuesta Metodológica. (Adaptado de SERNAGEOMIN, 2019a)	94
Tabla 6.2 Fuentes de información utilizadas para la Etapa 1.	94
Tabla 6.3 Resultados de investigación para Etapa 1.	95
Tabla 6.4 Ponderación y suma de puntajes ponderados para depósito de relaves abandonado La Paciencia.	96
Tabla 6.5 Ponderación y suma de puntajes ponderados para depósito de relaves abandonado Planta Whittle.	96
Tabla 6.6 Ponderación y suma de puntajes ponderados para depósito de relaves abandonado Puerto Cristal.	97
Tabla 9.1 Factores físico-naturales ponderados en Expert Choice (Figuroa, 2011). .	106

Tabla 0.1 Métodos o tecnologías para la medición de presiones de poro en depósitos de relaves y su aplicación en Chile y el mundo (Modificado de Castillo, 2016).	134
Tabla 0.2 Métodos o tecnologías para la medición de desplazamiento horizontal interno en depósitos de relaves y su aplicación en Chile y el mundo (Modificado de Castillo, 2016).....	135
Tabla 0.1 Formulario de Inspección Visual de Depósito de Relaves Abandonado	149

Índice de Figuras

Figura 2.1 Esquema general de un depósito de relaves (Carvajal, 2017).....	4
Figura 2.2 Mapa conceptual de elementos asociados a un depósito de relaves (Fundación Chile, 2018a).....	5
Figura 2.3 Esquema de Tranque de Relaves Convencional (Carvajal, 2017).....	6
Figura 2.4 Esquema de Disposición de Relaves Espesados - Método Robinsky (Ramírez, 2007).....	7
Figura 2.5 Métodos de construcción de tranques de relaves: a) Método de Aguas Arriba, b) Método de Aguas Abajo, c) Método de Eje Central (Ubilla, 2015).....	8
Figura 2.6 Perfil esquemático de la fuentes sismogénicas de Chile: (a) interplaca tipo “thrust”, (b) intraplaca de profundidad intermedia, (c) corticales y (d) “outer-rise”. (CSN, 2014).....	37
Figura 2.7 Depósito Tipo 1. Imagen satelital de Google Earth.....	41
Figura 2.8 Depósito Tipo 2. Imagen satelital de Google Earth.....	41
Figura 2.9 Depósitos Tipo 3 (derecha) y Tipo 4 (izquierda). Imagen satelital de Google Earth.....	42
Figura 2.10 Depósito Tipo 5. Imagen satelital de Google Earth.....	42
Figura 2.11 Depósito Tipo 6. Imagen satelital de Google Earth.....	43
Figura 2.12 Efecto del envejecimiento en arenas limosas de Troncoso, Ishihara y Verdugo, 1988 (Modificado de Troncoso, 1990).....	44
Figura 2.13 Funcionamiento de herramienta “Generar tabla de cercanía” de ArcMap 10.5 (ESRI, 2018a).	47
Figura 3.1 Depósito de relaves abandonado (ID 18) con presencia de muro claro y formación de laguna (Google Earth).	52
Figura 3.2 Depósito de relaves abandonado (ID 42) con evidencia de derrame (Google Earth).	53
Figura 3.3 Depósitos de relaves (ID 7, 65 y 125) ubicados en grupo (Google Earth). ...	53
Figura 3.4 Distribución por volumen aprobado de depósitos abandonados (SERNAGEOMIN, 2019a).	54
Figura 3.5 Distribución por área de depósitos abandonados (Elaboración propia).	55
Figura 3.6 Correlación entre área y volumen (Elaboración propia).....	56
Figura 3.7 Correlación entre área y volumen en escala logarítmica	56
Figura 3.8 Distribución de depósitos de relaves abandonados en Chile según altura inferida (Elaboración propia).	57

Figura 3.9 Distribución de depósitos de relaves abandonados en Chile según distancia a centros poblados (Elaboración propia).....	59
Figura 3.10 Distribución de depósitos de relaves abandonados en Chile según distancia a cuerpos de agua (Elaboración propia).....	60
Figura 3.11 Distribución de depósitos de relaves abandonados en Chile según distancia a zonas de interés (Elaboración propia).....	60
Figura 3.12 Distribución de depósitos de relaves abandonados en Chile según distancia a volcanes activos (Elaboración propia).....	61
Figura 4.1 Esquema conceptual de Propuesta Metodológica instrumentación y monitoreo para evaluar la estabilidad física de un depósito de relaves abandonado en Chile.	64
Figura 4.2 Propuesta de distribución de categorías en tramos.....	70
Figura 4.3 Diagrama de Categorización de la Etapa 3 (P-E3).....	73
Figura 4.4 Extracto de Esquema de Propuesta Metodológica (C-E3 y E4).....	74
Figura 4.5 Descripción del Monitoreo Simple (MS).	74
Figura 4.6 Diagrama de la Categorización de la Etapa 4 (P-E4).....	79
Figura 4.7 Extracto de Esquema de Propuesta Metodológica (C-E4 y E5).....	79
Figura 4.8 Descripción del Monitoreo Intermedio post Etapa 4 (MI4).	80
Figura 4.9 Extracto de Esquema de Propuesta Metodológica (C-E5, MI5 y MC).....	86
Figura 4.10 Descripción del Monitoreo Intermedio post Etapa 5 (MI5).	87
Figura 4.11 Descripción del Monitoreo Complejo (MC).	88
Figura 4.12 Descripción de Revisión posterior a eventos extremos.	89
Figura 9.1 Esquema conceptual de Propuesta Metodológica instrumentación y monitoreo para evaluar la estabilidad física de depósitos de relaves abandonados en Chile.....	105
Figura 0.1 Tipos de instalación de piezómetros a) Abierto, b) Cerrado (González, 2002).....	133
Figura 0.2 Piezómetro de tubo abierto tipo Casagrande (SENSOGEO).....	133
Figura 0.3 Piezómetro de tubo cerrado de cuerda vibrante (HCC).....	133
Figura 0.4 Esquema de a) desplazamiento, b) lecturas y c) resultados obtenidos de un inclinómetro (Suárez, 2009).	135
Figura 0.1 Efectos mecánicos de las ondas sísmicas. Ondas de cuerpo (a) ondas P y (b) ondas S. Ondas superficiales: (c) ondas Rayleigh y (d) ondas Love (Sáez, 2016).....	138
Figura 0.2 Esquema del dispositivo DCP	144
Figura 0.3 Ensayos de permeabilidad Lefranc a (a) carga hidráulica constante y b) carga hidráulica variable (GeologiaWeb).....	147

1. Introducción

El desarrollo económico y social en Chile está directamente relacionado con la minería. A mediados del siglo XIX, Chile se había convertido en uno de los productores principales de salitre del mundo. Sin embargo, la invención de los sustitutos sintéticos durante la Primera Guerra Mundial terminó con esta prosperidad económica. Gradualmente, el cobre sustituyó al salitre como la materia de exportación principal de Chile, lo que dio paso a un nuevo ciclo minero en el país. A fines del siglo XIX, el cobre ya era explotado mediante la extracción de un gran número de pequeños yacimientos de muy buenas leyes y con alta ocupación de mano de obra. El verdadero auge de la minería viene dado por el aumento en la demanda de cobre a nivel mundial y aumento de las inversiones extranjeras.

La minería de sulfuros de cobre convierte la roca a mineral de cobre, mediante el chancado, molienda y flotación. Solo una pequeña fracción corresponde a elementos económicos de interés (hoy representa menos del 1%). El resto del material, muy pobre en cobre, se denomina relave, y se debe depositar de forma segura y ambientalmente responsable. Pero la falta de regulación en el siglo XIX y la mayor parte del siglo XX, permitieron la extracción libre y sin controles de múltiples yacimientos y la posterior depositación de relaves sin evaluaciones medioambientales, sociales o económicas, generando una gran cantidad de depósitos de relaves sin control ni autorización del Estado (SERNAGEOMIN, 2015).

Hoy en Chile existen 742 depósitos de relaves. De ellos, 173 están abandonados, 103 activos, 462 no activos y 2 en construcción (SERNAGEOMIN, 2019A). Los depósitos abandonados no poseen dueño conocido ni resolución de origen y, en su mayoría, son muy antiguos.

En el presente trabajo de título, se propone una metodología para evaluar la estabilidad física de un depósito de relaves abandonado en Chile determinando los parámetros físicos relevantes para este tipo de estructuras y proponiendo un sistema de instrumentación para su monitoreo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Escoger los parámetros relevantes que determinan la estabilidad física de un depósito de relaves abandonado en Chile y proponer una metodología para el monitoreo e instrumentación de estos parámetros.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Complementar el *Catastro de Depósitos de Relaves* elaborado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) el año 2019 mediante el programa ArcMap de ArcGIS Desktop.

- Revisión de documentos nacionales e internacionales referentes a la disposición, manejo, legislación, instrumentación y monitoreo de depósitos de relaves, prestando especial atención a los abandonados.
- Elección de parámetros críticos que gobiernan la estabilidad física y la instrumentación adecuada para su monitoreo.
- Proponer una metodología para monitorear la estabilidad física de un depósito de relaves abandonado en Chile

1.2. Estructuración del trabajo

El presente trabajo se estructura en 9 capítulos principales, además de la Introducción, Glosario de siglas¹ y Anexos.

El Capítulo 2 revisa antecedentes sobre definiciones básicas de los depósitos de relaves, formas de depositación y estabilidad física de depósitos de relaves en forma general. Luego, se revisan los incidentes reportados a nivel mundial, prestando atención a los ocurridos en depósitos de relaves abandonados. Con esto en mente, se describen las formas más comunes de falla de los depósitos y los parámetros que las gobiernan. Se presenta la revisión de documentos que constituyen los antecedentes normativos y buenas prácticas a nivel nacional e internacional en países con prestigio internacional minero. También se incluye una descripción del programa utilizado para el desarrollo de la memoria y las herramientas, instrumentos y estudios propuestos para el producto final de este trabajo. Finalmente, se sintetizan las conclusiones generales de la revisión de antecedentes.

El Capítulo 3 resume la información del Catastro del SERNAGEOMIN y los nuevos aspectos obtenidos por medio del programa ArcMap. Se incorpora información relativa al estado general del depósito, como su área aproximada, existencia de un muro claro, presencia de derrame y si se encuentra en grupo. Además, se determina su ubicación relacionada a cuencas hidrográficas y unidades morfológicas, y distancia a puntos de interés. Con esto, se genera un Catastro de Depósitos de Relaves Abandonados, incluido en el Anexo B. Se incluye, además, un análisis de la información entregada.

El Capítulo 4 describe la Propuesta Metodológica de Instrumentación y Monitoreo para un Depósito de Relaves Abandonado en Chile. De manera paralela, en el Capítulo 5, se especifican las herramientas sugeridas para su aplicación acorde a las tecnologías disponibles al año 2019.

El Capítulo 6 corresponde a la aplicación parcial de la propuesta a un grupo de depósitos de relaves abandonados en Chile.

En el Capítulo 7 se analiza la propuesta metodológica, para luego concluir y entregar recomendaciones de trabajos a futuro en los Capítulos 8 y 9, respectivamente.

Finalmente, se incluye un glosario de las siglas y acrónimos utilizados durante el trabajo, las referencias consultadas y los anexos.

¹ Ubicado en página 108.

2. Revisión de Antecedentes

2.1. Relave y depósitos de relaves

El relave corresponde a una suspensión de sólidos en líquidos, formando una pulpa, que se generan y desechan en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina. El vocablo se aplicará, también, a la fracción sólida de la pulpa que se ha descrito precedentemente. (Decreto Supremo 248, 2007).

Para su almacenamiento se deben diseñar y construir Depósitos de Relaves definidos como toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una Planta de concentración húmeda de especies de minerales. Además, contempla sus obras anexas. 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).

Hay que considerar que esta definición se acuña recién en 2007, pero la minería en Chile lleva años operando, por lo que hay ciertos depósitos que no cumplen con esta definición.

Según el Catastro de Depósitos de Relave realizado por el SERNAGEOMIN en 2018, existen en Chile 740 depósitos de relaves en Chile, de los cuales 170 están abandonados, 101 activos y 469 no activos. Los depósitos activos corresponden a obras con dueño conocido y en operación. Los no activos son depósitos con dueño conocido, pero fuera de operación. En este caso, el dueño del depósito continúa con el control y monitoreo del depósito. Finalmente, los depósitos abandonados no tienen dueño conocido ni resolución de origen. Se incluye en esta categoría a los depósitos que se les ha verificado su condición de abandono, o si tienen información oficial o fidedigna que indique que no se efectuó ninguna medida de cierre.

En general, los depósitos de relaves se estructuran como se muestra en la Figura 2.1 y sus componentes son los que mencionan a continuación.

- **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)

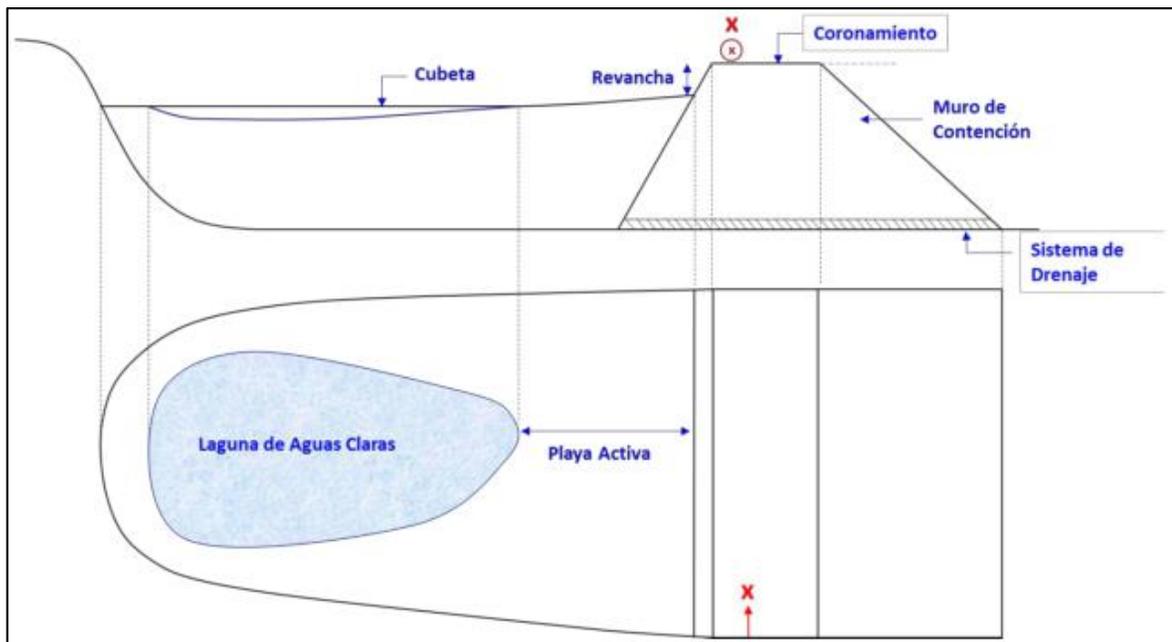


Figura 2.1 Esquema general de un depósito de relaves (Carvajal, 2017).

Los depósitos de relaves abandonados se caracterizan por su desuso y abandono, que se refleja en la ausencia de aguas claras y, en general, poseer un contenido de humedad muy bajo.

2.2. Tipos de depósitos de relave

La Figura 2.2 muestra un mapa conceptual de los principales aspectos en los que se puede clasificar un depósito de relaves. Los tipos de relaves se pueden depositar mediante diversas técnicas y erigir depósitos mediante diferentes métodos constructivos.

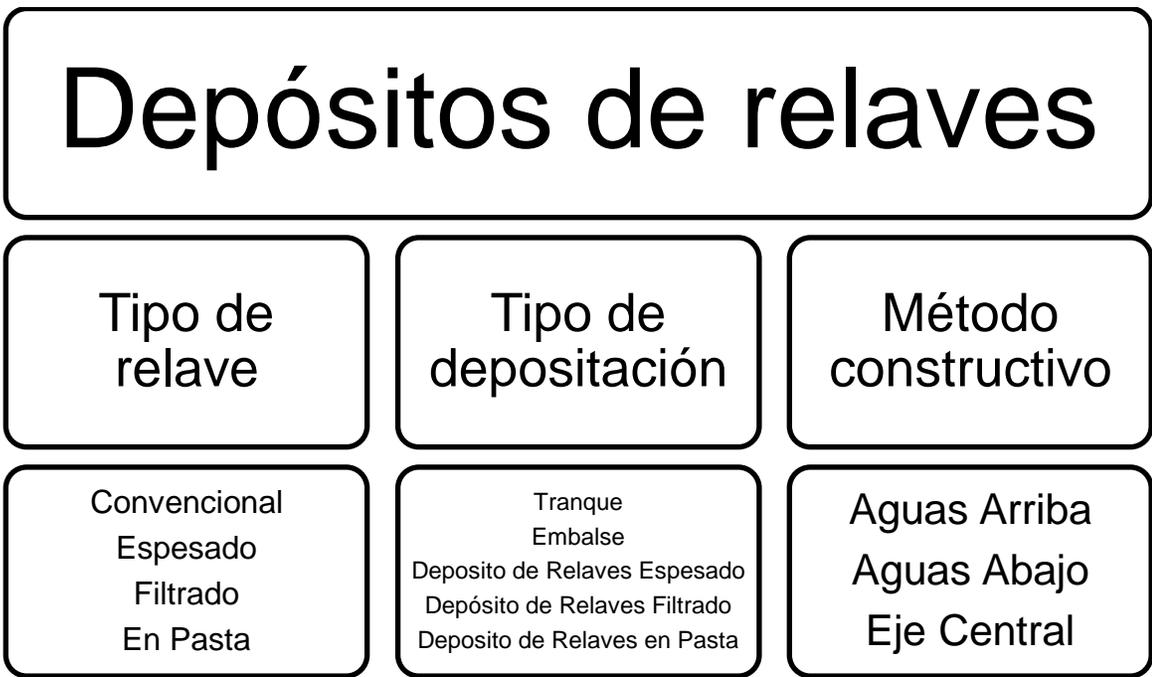


Figura 2.2 Mapa conceptual de elementos asociados a un depósito de relaves (Fundación Chile, 2018a)

2.2.1. Tipo de relave

- **Relave Convencional:** corresponde a relaves con contenidos de sólidos relativamente bajo (entre 30% y 50%). Se traslada mediante un transporte hidráulico en flujo turbulento, con posible segregación de partículas durante el transporte (Fundación Chile, 2018a). En general, el relave sale de la planta de proceso como una pulpa y se suele implementar un sistema de recuperación de agua en el depósito (Ubilla, 2015).

La recuperación de agua puede ocurrir previa a la depositación, lo que genera los siguientes tipos de relaves:

- **Relave Espesado:** Los relaves son sometidos a un proceso de sedimentación, donde se elimina una parte importante del agua que contiene el relave convencional (Decreto Supremo 248, 2007).
- **Relave Filtrado:** el relave convencional se somete a un proceso de filtrado, mediante equipos especiales de filtros, donde se asegura una humedad menor a 20%. Se depositan en forma mecánica, mediante correas o camiones. (Decreto Supremo 248, 2007; Fundación Chile, 2018a).
- **Relave en Pasta:** Corresponden a una situación intermedia entre el relave espesado y el filtrado, el cual contiene abundantes partículas finas y un bajo contenido de humedad. Requiere al menos de un 15% de concentración en peso de partículas de tamaño menor a 20 μ . La consistencia alcanzada permite que una pasta permanezca estable aun cuando esté varias horas sin moverse. La pasta puede formarse a partir de una gran variabilidad de componentes, tales como cuarzo, feldespato, arcillas, micas y sales (Ramírez, 2007).

A medida que se disminuye el contenido de agua de los relaves, se obtiene una mayor recuperación de agua de procesos y una disminución del área utilizada para la depositación de éstos.

2.2.2. Tipo de depositación

En relación a la forma de almacenamiento, se encuentran 5 tipos, según el tipo de relave: Convencional (Tranque y Embalse), Espesado, en Pasta y Filtrado. El Decreto Supremo 248 los define como:

- **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 2.3.

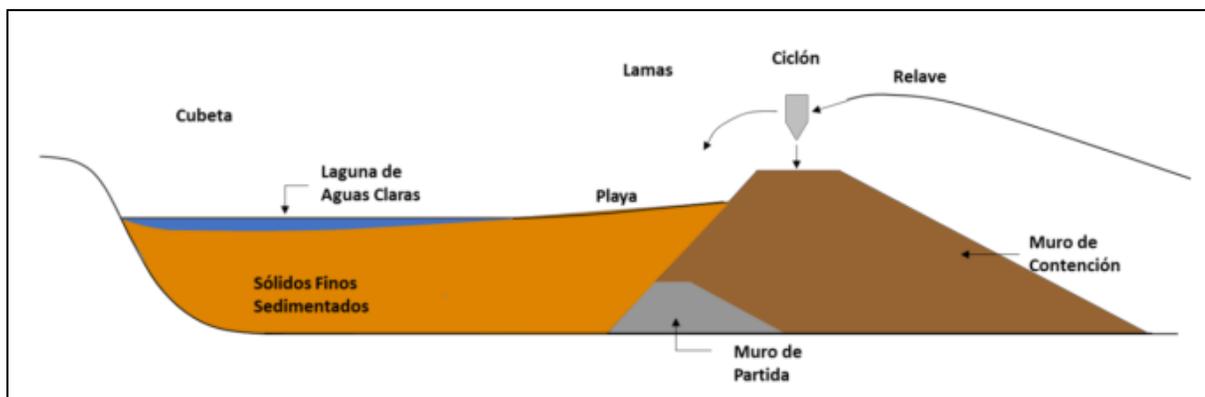


Figura 2.3 Esquema de Tranque de Relaves Convencional (Carvajal, 2017).

- **Embalse de Relave:** 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.
- **Depósitos de Relaves Espesados:** este tipo de depositación no requiere de un dique o muro resistente para su construcción. Los relaves se disponen en forma de cono cuya pendiente será la que corresponde a la respectiva concentración de sólidos. Se recomienda la construcción de un pequeño terraplén para contener el volumen de agua desalojada, para luego captarla por un vertedero u otro dispositivo y ser bombeada o recircularla (Ramírez, 2007). En la Figura 2.4 se muestra un esquema de este tipo de depositación.

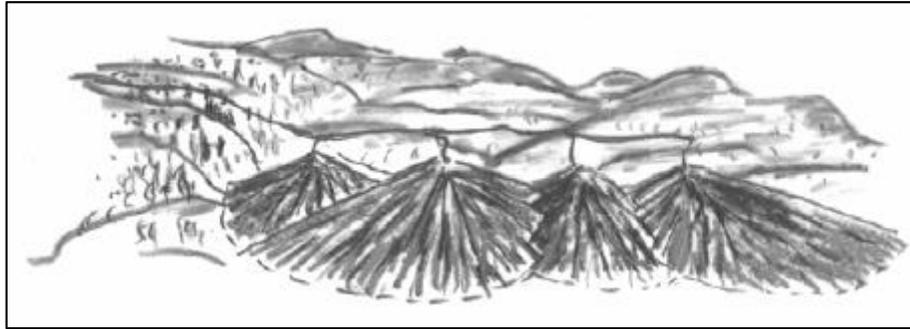


Figura 2.4 Esquema de Disposición de Relaves Espesados - Método Robinsky (Ramírez, 2007)

- **Depósito de Relaves Filtrados:** este tipo de depositación es muy similar al de los relaves espesados, con la diferencia de que el material contiene menos agua debido al proceso de filtrado utilizando filtros de prensa o de vacío. Se transporta al lugar de depósito mediante cintas transportadoras o equipos de movimiento de tierras y/o camiones.
- **Depósito de Relaves en Pasta:** Su depositación se efectúa en forma similar al relave filtrado, sin necesidad de compactación. Se transportan eficientemente en tuberías sin problemas de segregación o sedimentación y permiten una gran flexibilidad en el desarrollo del concepto del sitio de emplazamiento; una vez depositados los relaves, se dejan secar, luego acopiar, permitiendo así minimizar la superficie de suelo cubierto por relaves. La flexibilidad que permiten estos depósitos en cuanto al desarrollo del lugar de emplazamiento del depósito, puede ser extendida al uso de técnicas de construcción aguas arriba (Ramírez, 2007).

Existen otros tipos de depositación de relaves que en otras partes del mundo son factibles de desarrollar. Sin embargo, la legislación chilena no los contempla debido a existencia de grandes restricciones de las autoridades competentes desde el punto de vista legal, de la seguridad de las personas y del medio ambiente, aunque, se debe reconocer, que en el pasado se realizaron proyectos en Chile que utilizaron los siguientes tipos de depósitos (Ramírez, 2007):

- **Depósitos en Minas Subterráneas en Explotación**
- **Depósitos en Minas Subterráneas Abandonadas**
- **Depósitos en Minas Explotadas a Cielo Abierto**
- **Depósitos Relaves Radiactivos**
- **Depósitos costeros**
- **Depósitos submarinos**

2.2.3. Método constructivo

Los tranques pueden clasificarse según el método utilizado para el crecimiento del muro. Existen tres métodos, mostrados en la Figura 2.5 y explicados 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 2.5 a). En Chile este método está prohibido desde el 1970 (Decreto Supremo 86, 1970).

- **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 2.5.b) muestra un esquema de este método de construcción.
- **Método de Eje Central:** También llamado Método Mixto. 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 generado en la etapa anterior. Un esquema de este método se muestra en la Figura 2.5.c).

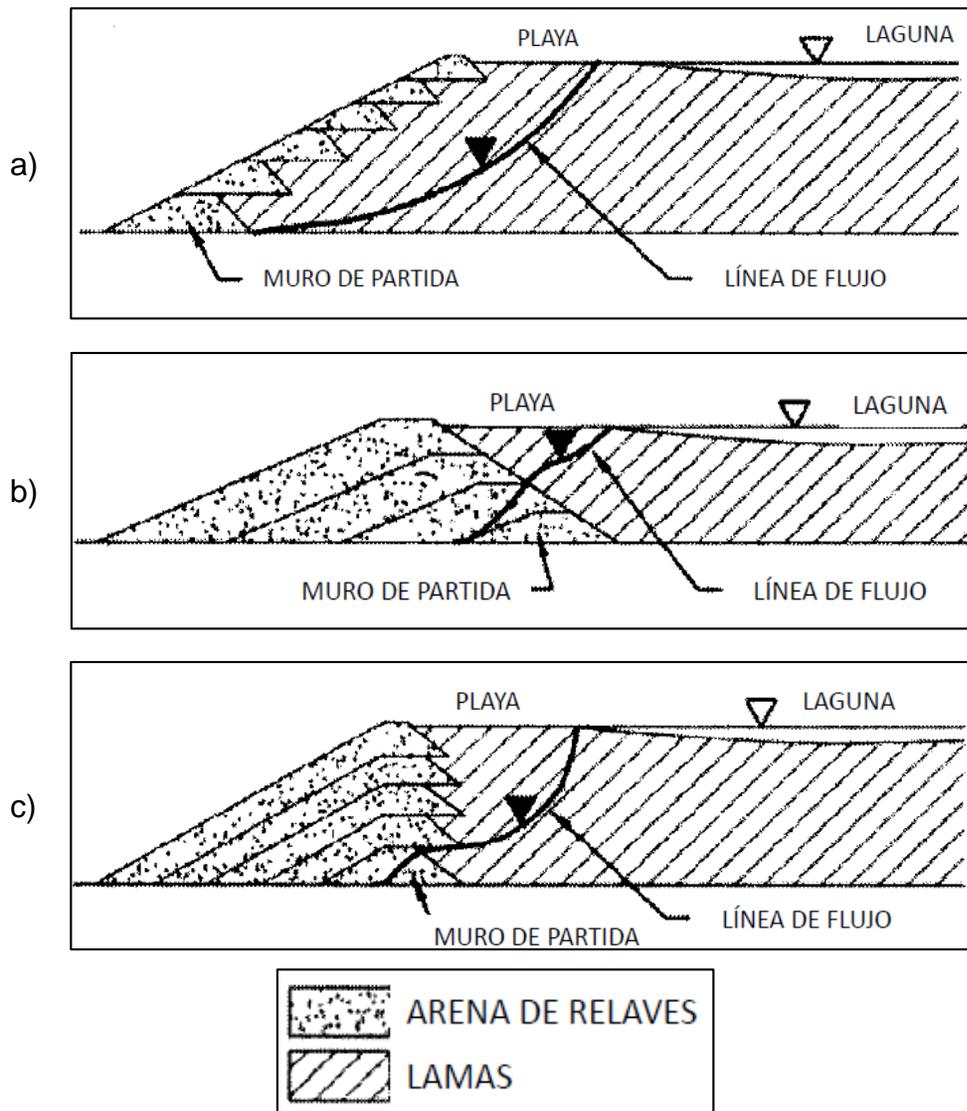


Figura 2.5 Métodos de construcción de tranques de relaves: a) Método de Aguas Arriba, b) Método de Aguas Abajo, c) Método de Eje Central (Ubilla, 2015)

2.3. Estabilidad física de depósitos de relaves

La Ley 20.551 define estabilidad física de depósitos de relaves como “situación de seguridad estructural, que mejora la resistencia y disminuye las fuerzas desestabilizadoras que pueden afectar obras o depósitos de una faena minera, para la cual se utilizan medidas con el fin de evitar fenómenos de falla, colapso o remoción”. Por

su parte, la “Guía Metodológica para Evaluación de Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes” afirma que “corresponderá a la respuesta esfuerzo deformacional a largo plazo de una estructura remanente, frente a sollicitaciones desestabilizadoras estáticas o dinámicas, que no requiere la implementación de obras, medidas ni actividades adicionales a las consideradas en el proyecto de cierre, para el resguardo de la vida, salud y seguridad de las personas y del medio ambiente”.

En definiciones internacionales, se encuentra la propuesta por Foster (1999) como “estabilización física de estructuras hechas por el hombre con el objetivo de no generar riesgo en términos de seguridad o impacto medioambiental”.

La eventual pérdida de estabilidad física se traduce en un desequilibrio de fuerzas que constituye un colapso parcial o completo del depósito. Estos incidentes son, en su mayoría, reportados por las empresas mineras al estado u organismo estatal responsable de la fiscalización de los depósitos de relaves. En Chile, este organismo es el SERNAGEOMIN.

2.4. Incidentes reportados a nivel mundial y nacional

Los documentos emitidos por la USCOLD en 1994 e ICOLD en 2001 definen y clasifican los diferentes incidentes históricos ocurridos en depósitos de relaves alrededor del mundo. La traducción es obtenida de la Guía Metodológica emitida por el SERNAGEOMIN en 2018.

Los incidentes se dividen en fallas y accidentes:

- **Fallas o roturas en depósitos de relave:** Grieta o brecha de un depósito que conduce a la liberación de relave contenido.
- **Accidentes en depósitos de relave:** daño físico como una grieta o movimiento de taludes que no resulta en una liberación del relave depositado. Los accidentes también incluyen situaciones físicas no dañinas, en la que se puede justificar una acción correctiva.

Los incidentes se diferencian en activo (el depósito se encuentra recibiendo relave) o inactivo (el depósito no se encuentra recibiendo relave) de acuerdo al estado del depósito al momento en que éstos se producen. Por lo tanto, se pueden encontrar fallas o accidentes tanto activos como inactivos.

En el Anexo A se encuentra el detalle de los incidentes reportados en depósitos de relaves abandonados en el mundo.

2.4.1. Incidentes a nivel mundial

A nivel mundial, del total de incidentes reportados en depósitos mineros (desde 1901 a 2017), el 45% de un total de 129 casos, se generaron en tranques o embalses de relave. Según la clasificación propuesta por USCOLD (1994) e ICOLD (2001), los incidentes (accidentes y fallas) se produjeron por las siguientes causas:

- **Inestabilidad de taludes** en condiciones estáticas, que incluye deslizamientos en los taludes del muro resistente del depósito;

- **Rebalse (overtopping)** en el depósito, debido a evento hidrológicos o deficiente control operacional de la laguna de aguas claras;
- **Inestabilidad** debido a los efectos producidos por movimientos **sísmicos**;
- **Seepage**, deficiencias de estabilidad relacionadas con filtraciones hacia al depósito y/o suelo de fundación de éste, incluyendo piping (tubificación).
- **Estructural**, deficiencias estructurales de un vertedero de canal abierto, estructuras de decantación o tuberías de descarga de relave.
- **Erosión**, daño erosivo superficial no relacionado con deficiencias estructurales;
- **Subsistencia de mina**, liberación de relave hacia trabajos subterráneos, o daños en el depósito causados por operaciones de minas subterráneas.

Tanto a nivel mundial (ICOLD (2001); Rico et al. (2008); Azam y Li (2010); Villavicencio et al. (2013); Kossoff et al. (2014); entre otros) como a nivel nacional (Dobry y Álvarez 1967, Castro y Troncoso 1989, Troncoso 2002, Villavicencio et al 2014, entre otros) se han hecho recopilaciones de incidentes en depósitos de relaves. A pesar que la información publicada es de gran valor, se encuentra incompleta, ya que es muy común la ocurrencia de incidentes pequeños que no se reportan en la literatura científica ni en los medios de comunicación populares, debido al miedo, mala publicidad y las ramificaciones legales que pueden surgir (Kossoff et al., 2014), o, al ser reportados, carecen de información básica (Azam y Li, 2010). Sin embargo, estas investigaciones representan la información base que se utilizará para el siguiente análisis.

Acorde a las bases de datos estudiadas, es posible concluir que:

- El 74% de los casos a nivel mundial han ocurrido en un pequeño número de países: EE. UU (39%), Europa (18%), Chile (12%) y Filipinas (5%).
- El 41% de los incidentes ocurrieron en tranques de relave y las principales causas de falla o colapso son las sollicitaciones sísmicas, overtopping, infiltraciones e inestabilidad de fundaciones.
- El 55% de los casos ocurrieron en depósitos cuyo muro era mayor a 15 [m] y sólo 22,6% ocurrieron en muros sobre los 30 [m].
- Las fallas debido a eventos climáticos extremos (lluvias) han aumentado de 25% pre-200 (198 eventos) a 40% post-2000 (20). Esto puede deberse a los cambios climáticos recientes.
- A nivel mundial, el 15% de los casos ocurre en depósitos inactivos o abandonados. En estos depósitos, las principales causas de falla es el overtopping y los terremotos.

Azam y Li (2010) validan estas cifras indicando que las fallas predominantemente ocurren en depósitos de “pequeño y mediano” tamaño, vale decir, hasta 30 [m] de altura y un volumen máximo de relaves de 5×10^6 [m³].

Las publicaciones de Davies (2002) e ICOLD (2001) plantean que las principales causas a nivel mundial son:

- Ausencia de control en el balance de aguas, generando overtopping
- Ausencia de control (mala calidad) durante la construcción
- Método de construcción aguas arriba
- Filtraciones
- Inestabilidad de talud

- Falta de comprensión de las características que garantizan una buena operación
- Fenómenos naturales extremos, como lluvias inusuales o terremotos

2.4.2. Incidentes a nivel nacional

En Chile, en contraste con el resto del mundo, la principal causa de falla ha sido la gran actividad sísmica, donde alrededor del 50% de los casos son generados por licuefacción sísmica, seguido en orden de ocurrencia por inestabilidad de taludes con deformaciones inducidas sísmicamente (32%), y en algunos casos, rebalse (18%). Los casos históricos causados por los terremotos de 1965, 1981, 1985 y 2010 en tranques de relaves de la V Región (Valparaíso, Chile Central), corresponden a un 68% de casos totales reportados. Por su parte, los incidentes causados por rebalse en la IV, V y VI región (Vallenar, Valparaíso y Rancagua, respectivamente), asociados a fuertes lluvias, exhibieron reducción de ancho de coronamiento, revancha insuficiente, y erosión progresiva del muro, que eventualmente resulta en una falla de flujo (Villavicencio et al., 2014).

Ocurren principalmente en tranques de relaves operacionales construidos utilizando el método de aguas arriba menores a 40 [m] en estado operacional (53%) o abandonados (47%) y asociados a la industria minera de mediana escala (Villavicencio et al., 2014).

A partir del análisis de los casos documentados, realizado por Villavicencio et al. 2014, es posible concluir que:

- En general se observan tranques de relave activos, abandonados o en cierre, construidos por el método “aguas arriba”, con alturas máximas menores a 50 m, pertenecientes al sector de la mediana minería del cobre.
- Como factores comunes de los casos causados por eventos sísmicos se encuentran: construcción con método “aguas arriba”, nula o deficiente compactación, taludes aguas abajo entre 1,2:1 y 1,7:1 (V:H) generados por simple depositación hidráulica de las arenas de relave cicloneadas, alto contenido de finos presente en la granulometría de las arenas de relave usadas para la construcción del muro y un alto grado de saturación (causado por precipitaciones, inadecuado manejo de aguas superficiales y/o aguas subterráneas).

Los incidentes de Barahona (1928), El Cobre (1965) y Las Palmas (2010) representan una pequeña muestra de las consecuencias de un inadecuado desempeño mecánico durante eventos sísmicos, que provocan falla estructural de los tranques de relave (Villavicencio et al., 2014).

En el Anexo A se encuentra un compilado de los incidentes reportados en Chile.

2.4.3. Último incidente reportado

La falla reportada más reciente corresponde a la ocurrida el 25 de enero de 2019 en la mina de hierro Córrego do Feijão, perteneciente a la empresa Vale S.A., ubicada en el municipio de Brumadinho, estado de Mina Gerais, sureste de Brasil. Hay que recordar que Vale S.A. y BHP Billiton Brasil Ltda., co-dueñas de Samarco Mineração S.A., saltaron a la palestra debido a la falla del depósito de relaves de Fundão el 5 de noviembre de 2015 (BBC News, 2019; Eisenhammer, S., 2019; Fundao Tailings Dam Investigation, 2015).

La construcción del depósito en Brumadinho comenzó en 1976 mediante el método de aguas arriba, con una altura de 86 metros y largo de coronamiento de 720 metros. Desde 2015, el depósito estaba inactivo, sin laguna de aguas claras y sin ninguna clase de operación en ella (Vale S.A., 2019).

La consultora alemana Tüv Süd realizó una auditoría en septiembre de 2018 en la que declaran que el depósito cumplía con los requerimientos legales (BBC News, 2019). Sin embargo, Vale S.A. sabía que el depósito era “dos veces más propensa a fallar que el nivel máximo de riesgo tolerado por la propia política de seguridad de la compañía” (Reuters, 2019).

De la información publicada a la fecha, se han reportado la desaparición de alrededor de 300 personas y que el lodo alcanzó el río Paraopeba, que alimenta el río Sao Francisco, destruyendo completamente la fauna acuática del lugar (Lopes, N. P., Freitas, R. P. D., & Rocha Filho, R. C., 2019).

Todavía no se conocen las causas del colapso, pero expertos creen que los mecanismos de falla más probables son la licuefacción estática y la erosión interna (Eisenhammer, 2019).

2.5. Mecanismos de falla

Se entiende por mecanismo de falla el proceso o secuencia de procesos generados por un evento gatillador que resulta en la inestabilidad del depósito (Fundación Chile, 2017). En este caso, se estudiarán los mecanismos de falla asociados a la inestabilidad física en tranques y depósitos de relave. La ocurrencia de estos eventos puede originar un colapso del muro y la posterior liberación de relaves de un depósito.

Los principales mecanismos de falla están relacionados con las siguientes condiciones:

- **Emplazamiento:** riesgo geológico y las características geográficas, climatológicas y sísmicas adversas del lugar.
- **Diseño:** Consideraciones inapropiadas de las propiedades geotécnicas del relave y del terreno, mala elección del método constructivo y características geométricas del tranque (drenaje basal, altura, ángulo de talud aguas abajo y volumen).
- **Operación y control:** Falta de procedimientos claros de control y monitoreo de parámetros críticos (propiedades del material, manejo del agua, cotas geométricas, nivel piezométrico, humedad, compactación, entre otras).

Estas condiciones fueron diferenciadas en características del depósito y eventos gatilladores (agente, fenómeno o intervención del tipo natural o antrópica que afecta la estabilidad de un depósito de relaves) para establecer y caracterizar los mecanismos de falla (Fundación Chile, 2017).

En función de los documentos revisados, se propone que los principales mecanismos que generan falla de los depósitos de relaves son los siguientes:

2.5.1. Licuación sísmica

Durante eventos sísmicos, los tranques de relave han mostrado ser muy susceptibles a la licuación, en caso de no ser diseñados, construidos y operados de manera adecuada.

Las solicitaciones sísmicas conducen a un aumento de las presiones intersticiales, sin posibilidad de una disipación rápida en relación al tiempo de carga, hasta anular parcial o totalmente los esfuerzos efectivos de confinamiento y por consecuencia la resistencia al corte de las arenas. Luego se genera el colapso de la estructura construida por las partículas, generando grandes deformaciones debido a la baja resistencia al corte que presentan bajo este escenario los materiales constituyentes.

En los casos de licuación sísmica reportados en tranques de relaves chilenos, el análisis permite identificar los siguientes factores (Troncoso et al. 1989, Verdugo 2011):

- Método constructivo “aguas arriba”, que genera fallas por licuación a nivel basal de muros resistentes (lamas sueltas no consolidadas)
- Baja densidad de las arenas de relave del muro debido a deficiente compactación mecánica aplicada.
- Arenas de relave del muro con alto contenido de finos
- Operación deficiente, donde la laguna de aguas claras se encuentra muy próxima al coronamiento del muro resistente durante la carga sísmica.

2.5.2. Inestabilidad de taludes

Cuando las presiones intersticiales se disipan, la acción sísmica puede ocasionar problemas de estabilidad de taludes, que se caracterizan por un desprendimiento importante del volumen del muro de contención debido a que, en general, las fuerzas solicitantes son mayores a las fuerzas resistentes. Se pueden observar desplazamientos y deformaciones significativas en el muro que pueden comprometer la integridad estructural y operativa del depósito, pudiendo provocar una pérdida de contención de los relaves.

Se identifican tres principales formas de falla: 1) falla en la fundación del muro, 2) falla en de las laderas cercanas al mismo, y 3) falla del muro mismo. El colapso sólo ocurre cuando la deformación es lo suficientemente grande para que se produzca un deslizamiento importante de material.

En general, estas fallas pueden ser generadas por los siguientes factores:

- Aumento del grado de saturación del talud, por variación de la posición del nivel freático en relación al considerado en el diseño, como consecuencia de lluvias intensas, condiciones hidrogeológicas, condiciones hidrológicas, inexistencia o mal funcionamiento del sistema de drenaje basal y/o mal manejo de laguna de aguas claras.
- Asociados al muro resistente como su geometría (ancho de coronamiento, altura de revancha y pendiente de taludes), problemas constructivos y/u operacionales (deficiente compactación, capas de baja resistencia asociado a arenas mal cicloneadas con alto porcentaje de partículas finas ($< 74 \mu\text{m}$) y de materiales (disminución de la resistencia al corte, permeabilidad elevada)
- Investigación geotécnica insuficiente y/o inapropiada caracterización del suelo de fundación.

Los posibles eventos gatilladores corresponden a lluvias que generan variaciones en el contenido de humedad del tranque y cambios en el nivel freático, colmatación de drenes del tranque, sismos que generan licuefacción (movilidad cíclica) de alguno de los

materiales y licuefacción estática. Otros gatillantes de carácter operacional corresponden a un aumento de carga asociado a mayores disposiciones de relave con respecto al diseño original y reducción del prisma resistente producto de excavaciones en el pie del muro.

Según Castro y Troncoso (1989) y Castro (2003), en un tranque de arenas de relave, un escenario de inestabilidad mecánica bajo condiciones sísmicas puede producirse al momento que las tensiones de corte inducidas por el sismo son superiores a la resistencia no drenada del material. Las deformaciones asociadas serán de gran magnitud, bajo las siguientes condiciones:

- El material presenta una densidad suelta y se encuentra en estado de saturación.
- La acción sísmica desencadena la falla si la deformación acumulada alcanza el valor de deformación inicial de activación

2.5.3. Rebalse (overtopping)

El rebalse se produce cuando el volumen de relave o agua de entrada al depósito excede la capacidad de manejo del embalse o si la laguna de aguas claras no es manejada de manera adecuada y se encuentra adosada al muro resistente, superando la altura de revancha. Cuando este rebalse genera una erosión importante en el muro de contención, se produce una falla progresiva que puede resultar en la formación de una brecha y el colapso. La altura de la revancha, el largo de la playa y el área y volumen de agua en el depósito son características clave en este mecanismo de falla.

Este mecanismo se divide en dos tipos. El primer fenómeno, presentado de manera más recurrente, es de tipo prolongado, causado por eventos hidrológicos extremos (precipitaciones intensas), un inadecuado diseño de las obras necesarias para controlar las aguas provenientes de escorrentía superficial (canales de contorno) o un deficiente control operacional de la laguna de aguas claras y depósito en general, entre otros casos. En menor medida, el segundo tipo es producto de la formación de una ola, generada por vientos, sismos o deslizamientos de laderas al interior de la cubeta.

En este contexto, existen dos escenarios de falla:

- Si la laguna de aguas claras se encuentra en contacto con el muro resistente del depósito, el nivel del agua aumenta al interior de éste, generando una pequeña zona de ruptura que comienza desde el pie del talud. Se puede producir una superficie de deslizamiento que puede conducir a una falla progresiva del depósito o, por otra parte, se puede desencadenar un mecanismo de falla por licuación estática debido al rápido aumento de las presiones intersticiales. (Davies et al. 2002, Fourie et al. 2001).
- Si el nivel de agua o bajo porcentaje de sólidos aumenta en la cubeta hasta sobrepasar la revancha, se genera un overtopping. Luego, se produce una zona que será afectada por el flujo, pudiendo conducir a un colapso parcial o total del depósito de relave. Como consecuencia, se libera el contenido de la cubeta en dirección aguas abajo.

2.5.4. Deformaciones sísmicamente inducidas

Las deformaciones que se producen en tranques de relave pueden representar reducciones significativas del muro resistente y se manifiestan en grietas progresivas con desplazamientos verticales y horizontales. Como ya se mencionó anteriormente, la pérdida de revancha y del coronamiento, es crítica para la seguridad del depósito y la capacidad de embalse de la cubeta.

De presentarse un exceso de presión de poros generado por cargas sísmicas, si el material de muro tiene comportamiento dilatante, se puede presentar el fenómeno de movilidad cíclica (Verdugo, 2005). De generarse este comportamiento, el material presentaría inicialmente unas deformaciones suaves o leves, que posteriormente se van incrementando progresivamente. Si las deformaciones son superiores a altura de revancha y/o reducen el ancho del coronamiento del muro resistente, pueden desencadenar una falla por “overtopping”.

Investigaciones realizadas en tranques de relave post-terremoto, permite identificar tres casos de deformaciones sísmicamente inducidas:

- Deformaciones bajo tensiones de tracción: Aparecen en el coronamiento de tranque, donde la amplificación es máxima y la presión de confinamiento es mínima. No constituyen riesgo de vaciamiento parcial o total de cubeta.
- Deformaciones por tensiones de corte sísmicas: si la aceleración sísmica sobrepasa a la aceleración que genera una condición de equilibrio límite en el talud del muro resistente, puede producir deslizamientos.
- Asentamientos por consolidación: las grietas son paralelas al coronamiento del tranque, con rotación y asentamiento del muro hacia la cubeta de embalse. Aparecen en muros construidos por los métodos “aguas arriba” y “eje central”.

A continuación, se presentan mecanismos de fallas no reportados ni documentados en Chile, pero que si se han generado en depósitos de relave de otros países mineros, y corresponden a erosión interna (piping), licuación estática y la inestabilidad por falla del suelo de fundación (USCOLD 1994; ICOLD 2001; Azam and Li 2010).

2.5.5. Erosión interna (piping)

El fenómeno de erosión interna, piping o tubificación se genera por un arrastre progresivo de las partículas más finas del material empleado dentro o debajo del muro de contención. Esto genera una vía de infiltración y luego un conducto que permite el flujo de agua o fracción del relave, que puede resultar en una falla local o general del depósito o suelo de fundación.

Los principales factores que producen este mecanismo son:

- La susceptibilidad del material a ser erosionado o resistencia a la erosión (plasticidad y dispersividad),
- generación de una carga hidráulica crítica (variaciones en el nivel freático cercano al muro, gradiente hidráulico y velocidades de flujo elevados, que inducen movimientos de partículas) y,

- la disminución de tensiones efectivas del suelo producto de un aumento de las presiones de poros, hasta valores críticos que generan un desequilibrio en la estructura del suelo.

2.5.6. Licuación estática

Este mecanismo es muy similar al de licuación sísmica, diferenciándose en los factores que lo producen. Los principales factores que desencadenan son los siguientes (Davies et al. 2002):

- Incremento de la presión de poros inducida por el incremento del nivel freático, y/o un cambio en la presión de poros desde una condición inferior que la hidrostática a igual que la hidrostática, o superior.
- Razón de carga excesiva debido a un crecimiento rápido del depósito.
- Esfuerzo de corte estático excesivo en la superficie de falla, llevando a una licuación “espontánea”.
- Movimiento del suelo de fundación lo suficientemente rápido para generar una condición de carga no drenada en los relaves susceptibles a un colapso espontáneo.

Como resultado de una falla por licuación estática se produce un colapso en el depósito, generando grandes deformaciones debido a la baja resistencia al corte que presenta el relave bajo este escenario. Ejemplos de falla por este mecanismo los constituyen los casos de los depósitos de relave de Sullivan (Canadá, 1991), Stava (Italia, 1995), y Bento Rodrigues (Brasil, 2015), entre otros.

2.5.7. Inestabilidad del suelo de fundación

Este mecanismo se genera por falta de información o mala interpretación de los antecedentes del sector de emplazamiento del depósito de relave (geología, hidrogeología y geotecnia, entre otros). Si existe un estrato de suelo débil o roca blanda, situado a una reducida profundidad bajo la estructura, se podrían generar movimientos a lo largo de un plano de falla si el peso del depósito produce esfuerzos que superen la resistencia al corte de los suelos que conforman el estrato débil. Un ejemplo reciente de este tipo mecanismo de falla corresponde al depósito de relave Mount Polley (Canadá, 2014).

Es importante señalar que, si bien en Chile no se ha informado ni documentado fallas por licuación estática ni fallas del suelo de fundación, se deben tener en cuenta debido a que las condiciones requeridas para la generación de ambos mecanismos pueden producirse en depósitos de relave en operación y cerrados (p.44 SERNAGEOMIN, 2018b).

2.6. Eventos gatilladores y parámetros críticos

Como se menciona en la sección 2.5, los mecanismos de falla que pueden generar inestabilidad de un depósito de relaves se asocian a condiciones del emplazamiento, diseño, operación y control. Estas condiciones se diferencian ente características del depósito y eventos gatilladores.

Los eventos gatilladores se definen como los agentes, fenómenos o intervenciones de tipo natural (lluvia, viento, sismos, entre otros) o de tipo antrópico (modificaciones en los canales de contorno, obras de desvíos de cauces, entre otros) que pueden afectar la estabilidad del depósito. Se debe tener en consideración que la falla física del depósito puede estar asociada a la presencia u ocurrencia de un solo evento o debido a la combinación de varios (Fundación Chile, 2017).

Por su parte, se definen los parámetros críticos como las propiedades cuantificables del depósito que de manera individual o en conjunto podrían afectar a su estabilidad física, tales como la granulometría del material del muro, la presión de poros del muro y cubeta, la pendiente de la playa, la altura de la revancha, entre otros (Fundación Chile, 2017).

La estabilidad física de un depósito se puede ver comprometida a través de varios mecanismos de falla, los que en términos generales pueden ser representados por los mecanismos de rebalse, erosión interna e inestabilidad de taludes. Se enumeran los eventos gatilladores y parámetros críticos de estos tres mecanismos en las Tablas Tabla 2.1, Tabla 2.2 y Tabla 2.3, para rebalse, erosión interna e inestabilidad de taludes respectivamente (Fundación Chile, 2017).

Los eventos gatilladores pueden estar asociados a condiciones naturales (N), problemas de diseño (D) u operación (O) del depósito.

Con respecto a los parámetros críticos, éstos son preliminarmente ordenados acorde a su relevancia en el desencadenamiento de alguno de los mecanismos de falla. Para el caso del rebalse destacan los parámetros críticos de revancha y deformación del coronamiento. En el caso de la erosión interna, los parámetros críticos más relevantes corresponden a la presión de poros en el muro y el terreno de fundación, y el sistema de drenaje. Finalmente, para el caso de inestabilidad de talud se identifican la geometría del muro, las aceleraciones sísmicas en el muro y la resistencia al corte del material del muro.

Tabla 2.1 Eventos gatilladores y parámetros críticos para el mecanismo de falla de Rebalse (Fundación Chile, 2017).

Rebalse (Overtopping)	
Eventos Gatilladores	Parámetros Críticos
Lluvia, crecida o viento (N)	Revancha
Deslizamiento hacia el interior del depósito (N)	Posición/Área laguna de aguas claras
Sismos (N)	Deformación del coronamiento
Falla vertedero de emergencia (O)	Caudales de ingreso y salida
Falla del sistema de recuperación de aguas claras (OP)	Aceleraciones sísmicas en el muro
Falla de los canales perimetrales (D, O)	Pendiente de la playa
	Bloqueo sección de paso en vertedero
	Presencia de grietas en coronamiento

Tabla 2.2 Eventos gatilladores y parámetros críticos para el mecanismo de falla de Erosión interna (Fundacion Chile, 2017).

Erosión interna (piping)	
Eventos Gatilladores	Parámetros críticos
Aumento de gradiente hidráulico en el depósito (N, O) Aumento de gradiente hidráulico en el suelo de fundación (N, O) Asentamientos diferenciales (N, O) Variación del nivel freático (N, O) Colapso del sistema de drenaje (N, O)	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. Características reológicas de relave.

Tabla 2.3 Eventos gatilladores y parámetros críticos para el mecanismo de falla de Inestabilidad de taludes (Fundacion Chile, 2017).

Inestabilidad de taludes	
Eventos Gatilladores	Parámetros críticos
Lluvias que generan variaciones en el contenido de humedad del depósito y cambios en el nivel freático (N) Sismos que generan licuefacción de alguno de los materiales (N) Licuefacción estática (N, O) Cargas asociadas a mayores disposiciones de relave con respecto al diseño original (O) Reducción del prisma resistente mediante excavaciones en el pie del muro (O) Colapso del sistema de drenaje (N, O)	Geometría del muro Nivel freático del muro y depósito Presiones de poros del muro y depósito Aceleraciones sísmicas del muro Nivel de compactación del muro Granulometría del material del muro Rigidez y resistencia al corte del muro Rigidez (Vs) y resistencia del suelo de fundación Sistema de drenaje y recirculación Desplazamientos del muro Fenómenos de subsidencia en el muro Estabilidad del estribo Tonelaje

Los eventos gatilladores y parámetros críticos recién presentados pertenecen a la literatura de los depósitos de relaves en general, prestando especial atención a los activos e inactivos. Sin embargo, no se ha encontrado información sobre este tema relacionada con los depósitos de relaves abandonados.

Para los depósitos activos, algunos de los parámetros críticos cuentan con criterios de aceptabilidad y/o rangos de uso para asegurar el correcto desempeño. Estos parámetros

son evaluados trimestralmente por la autoridad gubernamental (SERNAGEOMIN) mediante los formularios E700.

En la Tabla 2.4 se han agrupado los principales factores que tienen incidencia directa sobre los mecanismos de falla de acuerdo a los antecedentes expuestos hasta el momento (SERNAGEOMIN, 2018b).

Tabla 2.4 Grupos y factores asociados a mecanismos de fallas de un depósito de relave abandonado. (Adaptado de SERNAGEOMIN, 2018b)

Grupo	Denominación	Factores
1	Tipos de depósito y método constructivo	Tranque de arenas de relave Embalses de relave Aguas arriba, aguas abajo o eje central
2	Configuración geométrica	Altura de revancha Ancho de coronamiento Pendiente global del talud
3	Características mecánicas del relave y nivel de compactación en depósito y muro	Granulometría y plasticidad de la fracción fina Nivel de compactación Resistencia al corte
4	Suelo de fundación	Caracterización del suelo de fundación
5	Antecedentes analizados de instrumentación y monitoreo	Posición de niveles freáticos Funcionamiento sistema de drenaje Aceleraciones sísmicas Movimiento de muros y/o depósitos Otros
6	Entorno regional	Sismicidad Crecidas Lluvias Régimen de vientos
7	Grado de implementación de medidas para asegurar la estabilidad física en la etapa de cierre, si existiese	Verificación de obras y acciones implementadas

2.7. Antecedentes normativos y Buenas Prácticas en Chile y el Mundo

A nivel nacional e internacional, existen documentos de diversa índole (decretos, leyes, reglamentos, guías, manuales de buenas prácticas, entre otros) que regulan las diferentes etapas del ciclo de vida de los depósitos de relaves. A continuación, se intenta recopilar la información relevante de cada uno de estos, para comprender tanto la reglamentación, exigencias, estado del arte y estado de práctica del monitoreo e instrumentación principalmente, de los diferentes países estudiados.

En el siguiente capítulo se basa en la exhaustiva revisión realizada por el SERNAGEOMIN en 2018, titulada “Estudios de Normativas Internacionales de Diseño, Construcción, Operación, Cierre y Post Cierre de Depósitos de relaves”.

Se estudian los documentos chilenos y los de países con historia y buenas prácticas mineras, como lo son Australia, Estados Unidos y Canadá; y Perú, por su similitud geotectónica con Chile. Además, se incluyen documentos generados por organismos internacionales.

Chile regula de manera específica sus relaves mineros, a diferencia de otros países que “aplican suplementariamente normas que regulan los desechos mineros, normas medioambientales, de aguas o de reservas acuíferas, reglamentos sobre el uso de suelos, reglamentos sobre el tratamiento de residuos peligrosos y no peligrosos, reglamentos de salud, de obras públicas, códigos sanitarios, leyes indígenas, etc.” (SERNAGEOMIN, 2018c).

Chile cuenta con un reglamento específico que entrega estándares, parámetros de diseño y métodos constructivos, mientras que el resto de los países presentan indicaciones generales en sus normas, basándose y recomendado el uso de guías que entregan recomendaciones técnicas y específicas. En la mayoría de estos países aparecen los “comités de expertos revisores” o se formaliza la figura de “profesional competente”, encargados de preparar o revisar aspectos técnicos relevantes para asegurar estabilidad y pertinencia de la construcción (SERNAGEOMIN, 2018c).

2.7.1. Chile

A nivel nacional, el Decreto Supremo N°248 de 2007 “Reglamento para la aprobación de proyectos para el diseño, construcción, operación, y cierre de depósitos de relaves” (en adelante DS N°248) regula el diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves. En él, se indica que se requiere la aprobación del SERNAGEOMIN para construir y operar depósitos de relaves y que cualquier modificación debe ser aprobada antes de su implementación. Además, los tranques de relave necesitan de la aprobación de la DGA, cuando superan los cinco mil metros cúbicos y para terminar con la operación de los tranques de relaves, SERNAGEOMIN debe aprobar un Plan de Cierre, que incluye tanto medidas ambientales como de seguridad para asegurar la estabilidad física y química del lugar donde se encuentra la faena minera. Toda empresa minera sujeta al procedimiento de aplicación general debe constituir una garantía financiera para asegurar el cumplimiento de la operación de cierre (SERNAGEOMIN, 2018c).

La letra n) del artículo 14 del DS N°248 indica que cuando corresponda, se deben describir “los sistemas de instrumentación y control que se usarán para monitorear el

comportamiento estructural, hidráulico del depósito, incluyendo las variables: presiones de poros, niveles freáticos, desplazamientos, asentamientos, filtraciones, aceleraciones sísmicas, y otras recomendadas por el proyectista”. (Ministerio de Minería, 2017)

Además, se requieren análisis de estabilidad para el depósito de relaves en las fases operativas y de cierre, haciendo análisis estáticos, pseudo-estáticos, dinámicos y en condición de cierre. La aplicabilidad de estos análisis depende de la altura del depósito de relaves (menor o mayor a 15 m) y el factor de seguridad siempre debe ser mayor que 1,20. Además, se debe terminar la distancia peligrosa y se debe definir un “sismo máximo”, basado en datos sismográficos históricos de la región (Ministerio de Minería, 2017).

La Ley N° 20.551 de 2011, Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras (Ley 20.551) tiene como objetivo asegurar la estabilidad física y química del lugar en donde se encuentran las instalaciones y otorgar el debido resguardo a la vida, salud y seguridad de las personas y del medio ambiente. Esta ley encomienda al SERNAGEOMIN revisar y aprobar los aspectos técnicos de los planes de cierre de faenas mineras y sus actualizaciones, como asimismo comprometer a las empresas mineras a un cierre efectivo a hacerse cargo de sus pasivos ambientales, otorgando facultades de supervigilancia, fiscalización y aplicación de sanciones.

Complementando esta ley, el Decreto Supremo N°41 de 2012 del Ministerio de Minería, que aprueba el “Reglamento de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras” (DS-41), entre otras cosas, dicta guías metodológicas relacionada con los Planes de Cierre.

El DS N°50 del Ministerio de Obras Públicas de 2015 (DS-50) aprueba el reglamento del artículo 295 del “Código de Aguas”, donde dispone que los embalses o tranques de relaves y, en general, cualquier obra con capacidad de almacenar o conducir agua o elementos transportados mediante ésta, se encuentran incluidos en sus disposiciones.

En 2007, SERNAGEOMIN emite la “Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves” que tiene por objetivo, entre otros, entregar recomendaciones sobre medidas de control operacional y de mantención en depósitos de relaves, destinadas principalmente a pequeños productores mineros. A continuación, se detallan algunas medidas (Ramírez, N., 2007):

- Realización de controles periódicos mediante densidad in-situ en el muro de arenas y determinar densidades relativas ya que indican, en cierta medida, el grado de compactación con que cuenta el muro. Mantener la práctica de compactar el talud exterior a lo largo del muro de arenas.
- Control del nivel freático mediante piezómetros en el muro de arenas y compararlo con la cota del nivel del coronamiento del muro de partida impermeabilizado.
- Disminuir rápidamente el nivel freático cuando éste es alto evacuando agua clara de la laguna. Sugieren mantener una estadística gráfica de los niveles freáticos controlados
- Control periódico de granulometría de las arenas de relave.
- Mantener una revancha suficiente.
- Verificación periódica del ángulo de talud operacional.
- Control periódico de nivel y posición de la laguna de aguas claras.
- Mantener operativas torres colectoras u otro medio para evacuar aguas de la laguna.

- Reparar grietas o fisuras que se pudieren producir, ya que son potenciales puntos débiles.
- Suspensión de operación debido a fenómenos naturales extremos imprevistos, hasta que las condiciones de seguridad se restablezcan.

Y medidas a considerar al cierre y posterior abandono, destacan:

- Secado de la laguna de aguas claras.
- Dejar operativos los canales perimetrales interceptores de aguas de laderas
- Mantenimiento del sistema de evacuación de aguas lluvias.
- Estabilización de taludes (considerando máximo sismo probable de ocurrencia en la zona de emplazamiento).
- Instalación de cierres de acceso al lugar donde se encuentran los relaves.
- Habilitación de vertederos de seguridad (diseñado considerando el evento de máxima crecida probable).
- Compactación de la berma de coronamiento.
- Recubrimiento con material adecuado para evitar la erosión eólica o también para posibilitar la forestación del tranque en aquellos lugares en donde es factible hacerlo.

En la Guía Metodológica para el Cierre de Faenas Mineras, publicada por SERNAGEOMIN en 2002, se dice que menciona la necesidad de establecer una línea de base del depósito, junto a los parámetros que serán utilizados para caracterizar el estado y evolución de dichos elementos; la identificación de los sitios de medición y control; los métodos y procedimientos empleados en la obtención de los resultados; la frecuencia de las mediciones; el tiempo de ejecución del seguimiento; las obras que se implementarán para estos efectos; y cualquier otro aspecto relevante para evaluar la efectividad del plan de cierre. Se detallan los principales riesgos a los que estará expuesto el depósito en su fase de cierre y post cierre (Inestabilidad del tranque (licuefacción), percolación de aguas contaminadas, arrastre del relave en caso de crecidas, contaminación atmosférica por material particulado, accidentes de personas) y se proponen medidas y acciones del plan de cierre para cada uno de estos riesgos.

Por otro lado, el Centro de Estudios del Cobre y la Minería (CESCO) realizó la CESCO Week, entre el 8 y 11 de abril de 2019 en Santiago de Chile. El evento reúne a los líderes de la industria de la minería del cobre a nivel global, representantes de diferentes empresas y autoridades relacionadas con la minería, en seminarios y foros. En esta instancia, en un seminario dedicado íntegramente a relaves, el Subsecretario de Minería presenta una nueva “Política Nacional de Relaves”, que propone las siguientes herramientas de gestión para los depósitos abandonados e inactivos (Ministerio de Minería, 2019):

- Monitoreo satelital
- Programa de Compensación de Relaves SEIA: Cambio en la lógica de compensación al hacer que las empresas se hagan cargo de estabilización química y física de depósitos de relaves abandonados.
- Reprocesamiento: Los avances tecnológicos han aumentado el rendimiento de todo el proceso minero. Además, ha habido una disminución importante de la ley del cobre que hace rentable la explotación de un yacimiento. Se debe estudiar una

normativa especial para promover el reprocesamiento de los relaves y recuperar valor convirtiendo los pasivos medioambientales en activos.

- Banco de Ideas: Recopilación de medidas innovadoras (I+D+I) para el tratamiento de los pasivos ambientales mineros.
- Nuevos Usos: En la literatura se pueden encontrar algunas referencias de nuevos usos que se le pueden dar a los relaves, convirtiendo estos pasivos ambientales en materias primas. Éstos sólo representan algunos, que deben ser estudiados para ser aplicados e incentivados en Chile.
 - Romero y Flores (2010) proponen dar valor agregado al relave mediante el uso del relave como un agregado de construcción para la fabricación de ladrillos y baldosas.
 - Ahmari y Zhang (2011) estudian la factibilidad de la producción de ladrillos eco-amigables por medio de la geopolimerización de relaves de la industria cuprífera. A diferencia de los métodos convencionales de producción de ladrillos, esta propuesta no incluye el uso de arcillas ni pizarra, ni requiere el uso de altas temperaturas de curado, lo que tiene beneficios medioambientales y ecológicos.
 - Bian et al. (2012) exponen que, luego de una correcta evaluación, los desechos mineros pueden ser reusados para extraer minerales, proveer combustible adicional para centrales eléctricas, suministrar materiales de construcción y reparar estructuras superficiales y subterráneas alteradas por la actividad minera.

Se presenta también un programa piloto que tiene por objetivos:

- Realizar estudios de título de relaves abandonados
- Actualizar fichas de riesgo de SERNAGEOMIN
- Determinar volumen de depósitos de relaves
- Determinar estado de permisos y situación actual

Como resultados de esta nueva política, se priorizaron 23 faenas Clase 1 PAM que poseen 37 depósitos de relaves, tanto inactivos (36) como abandonados (11), bajo los siguientes criterios:

- Catastro de Depósitos de Relaves SERNAGEOMIN 2018
- SYSPAM CLASE I (Faenas que son a lo menos un riesgo significativo para la salud o seguridad de las personas, el medio ambiente o actividades económica)
- Acceso y Distancia a la Población (menor a 3 km)
- Validación en terreno (E-400)

Los 11 depósitos abandonados que según esta clasificación serían riesgosos, se encuentran en el Catastro de Depósitos de Relaves Abandonados (Anexo B) identificados en color verde.

2.7.2. Perú

Perú posee condiciones sísmico-climáticas similares a las zonas de desarrollo minero nacional. La topografía es extrema, los muros de los depósitos de relaves alcanzan grandes alturas, los terremotos son frecuentes y la hidrología no se comprende muy bien (Martin y Davies et al., 2002).

El DS N° 40 prohíbe expresamente la construcción de presas de relave con el método de aguas arriba, así como la disposición submarina o subacuática de desmontes, relaves y otros desmontes sólidos de la actividad minera. Solo se pueden autorizar excepcionalmente cuando no exista otra alternativa ambientalmente viable (MINEM, 2014).

La Ley N°28.090 de 2003, “Ley que regula el cierre de minas” (Ley-Pe 28.090), regula las obligaciones y procedimientos que deben cumplir para la elaboración, presentación e implementación del Plan de Cierre de Minas (SERNAGEOMIN, 2018c).

El DS N°33-2005-EM de 2005, “Reglamento para el cierre de Minas” (DS-Pe-33) establece las especificaciones de la presentación de plan de cierre y sus contenidos, el procedimiento de aprobación, modificación y ejecución del plan, así como especificaciones con respecto al cálculo de las garantías ambientales. Básicamente este reglamento viene a complementar las disposiciones de la Ley N°28.090 con el objeto de prevenir y minimizar los riesgos a la salud, seguridad de las personas, el medio ambiente, que puedan derivarse de las operaciones de la actividad minera (MINEM, 2015).

La legislación peruana exige al concesionario una serie de medidas, entre ellas (SERNAGEOMIN, 2018c):

- La construcción de los depósitos de relaves debe basarse en estudios geotécnicos previos a la etapa de operación
- Priorizar el uso de sólidos contenidos en los relaves para optimizar el área de disposición final
- Priorizar la circulación del agua contenida en los relaves al proceso de beneficio
- Establece la necesidad de utilizar materiales impermeables y sistemas de control

El plan de cierre debe contener una serie de medidas, entre las cuales están aquellas necesarias para rehabilitar el lugar y para asegurar la estabilidad física y química, medidas de rehabilitación colectivas e individuales. Por último, el usuario está obligado a constituir una garantía financiera que puede consistir en fianzas, fianzas solidarias u otros mecanismos semejantes, que deben cumplir con la Ley del Sistema Financiero y Seguros, así como con los reglamentos de las superintendencias de la misma materia. También se pueden constituir otros seguros, cauciones o fideicomisos (SERNAGEOMIN, 2018c).

En agosto de 1997, el MINEM publica la “Guía Ambiental para la Estabilidad de Taludes de Depósitos de Desechos Sólidos de Mina”, que tiene por objeto “proporcionar una perspectiva general de los asuntos de estabilidad de taludes en el planeamiento, diseño, operación, mantenimiento, y cierre de los depósitos de desechos de mina”. El capítulo 6 de esta guía lleva por título “Monitoreo y mantenimiento de depósito de desechos” y establece los requerimientos de monitoreo, registros y actualizaciones de regulación y procedimientos. Además, describen los instrumentos y métodos para monitorear las descargas de percolación, el nivel freático, presión de poros, sismicidad, presión dinámica de poros (licuefacción), movimientos verticales y horizontales y asentamientos diferenciales. En la Tabla 2.5, se presentan los factores recomendados a medir (MINEM, 1998).

En esta guía se indica que “se debería conservar y archivar adecuadamente durante la vida operativa de la mina los registros completos del diseño, construcción y

comportamiento de la presa y el pozo de relaves, así como de cualquier evento que afecte o pueda haber afectado la seguridad de la presa de relaves” (MINEM, 1998).

Tabla 2.5 Recomendaciones de monitoreo (MINEM, 1998)

<p>Medición e inspección visual diaria de todos los factores que influyen directamente en la seguridad de la presa</p>	<p>Ancho de playa Revancha Posición del nivel freático Presión de poros Movimiento horizontal y vertical de la cresta de la presa de arranque y del talud aguas abajo Todos los procedimientos de disposición de relaves</p>
<p>Medición y pruebas de todos los factores relacionados con la evaluación de estabilidad en cada etapa de construcción y especialmente cuando se aproxima a la altura máxima final</p>	<p>Distribución y zonificación de los relaves depositados Presión de poros Sedimentación diferencial Sismicidad y presión dinámica de poros y características dinámicas de los relaves depositados Revisión de consolidación, sedimentación y estabilidad en la altura final durante los años de elevación de la presa</p>
<p>Mediciones que sirven para mejorar las técnicas de relleno hidráulico</p>	<p>Ancho de la playa Tamaño de partícula inicial de los relaves Densidad de pulpa Densidad de pulpa desde cada salida de la descarga de gruesos Distribución de los relaves depositados a lo largo de la playa según el tamaño de partícula, densidad y propiedades mecánicas del suelo.</p>

El año 2006, el MINEM publica la “Guía para la elaboración de Planes de Cierre de Minas”, en la que presenta el formato estándar para la preparación de planes de cierre de minas en las diferentes etapas del ciclo de vida de la mina. En ella se pide la descripción de las medidas ejecutadas o propuestas para incrementar la estabilidad de las represas, estabilidad de las superficies de relave expuestas y para evitar el acceso del público a los relaves. Sobre el monitoreo de estabilidad física en la etapa post-cierre, se deben describir las inspecciones al depósito en caso de terremotos, inundaciones u otros eventos extremos, la instrumentación instalada para monitorear la inestabilidad del depósito y su frecuencia de lectura y presentar cronogramas de inspección de los depósitos y de las instalaciones de transporte de agua (MINEM, 2006).

2.7.3. Australia

En Australia, tanto los relaves como otros productos de desechos mineros, son tratados en los planes de gestión ambiental que se presentan para cumplir con aprobaciones ambientales a nivel estatal y de gobiernos territoriales. Sin embargo, si existe un proyecto de almacenamiento de relaves o de desechos y este tiene un impacto significativo a nivel nacional, este deberá ser aprobado bajo el alero de la regulación “Environment Protection and Biodiversity Conservation Act”, de 1999. La finalidad de esta ley y de las autoridades reguladoras en general, es que estos depósitos sean seguros, es decir que mantengan la estabilidad tanto física como química, durante las operaciones y después del cierre de

la mina. Algunos estados, como Australia Occidental, han emitido guías respecto del diseño de los depósitos de relaves (SERNAGEOMIN, 2018c).

En Australia existe, además, el deber de informar al Departamento de Minas y Petróleos (DMP) sobre la investigación, diseño, supervisión de construcción, clasificación del riesgo y altura de los muros, que van derivando en diferentes categorías fijadas por el código de prácticas de dicho departamento. A partir de lo anterior, se determina la autorización para la construcción de los tranques de relaves (SERNAGEOMIN, 2018c).

El DMP ha publicado una gran variedad de documentos relacionados al manejo de depósitos de relaves. Algunos son:

- En 1999, la guía “Guidelines on the Safe Design and Operating Standards for Tailings Storage” establece criterios para el diseño, construcción, operación y rehabilitación de depósitos de relaves. Asimismo, aporta recomendaciones para el monitoreo y el control de las filtraciones. Se enfoca en la adopción de un enfoque a largo plazo, priorizando el control durante la operación del tranque, asegurando una disposición sistemática de relaves y una cuidadosa gestión del agua (Fundación Chile, 2018a).
- En 2013, “Tailings Storage Facilities in Western Australia: Code of Practice”. Corresponde a una guía que contiene la normativa que debe ser cumplida por legislación. Se recomienda que sea utilizado por quienes tienen funciones y responsabilidades en la elección de sitio de emplazamiento, diseño, construcción, operación, monitoreo y vigilancia, planificación de respuesta ante emergencias, y manejo o rehabilitación de depósitos de relaves. Sobre monitoreo e instrumentación menciona (Fundación Chile, 2018a; DMP, 2013)
 - En Operación, se debe entregar roles y responsabilidades para el manejo del depósito, además de procedimiento, especificaciones y tolerancias de, entre otras cosas, instrumentación, monitoreo y requerimientos de inspección y su respectivo programa.
 - Se deben registrar, entre otras cosas, los niveles piezométricos de la cubeta, muro y otras estructuras y propiedades in situ físicas, químicas, reológicas y geotécnicas de los depósitos.
- En 2015, “Tailings Dam Audit – Guide”, donde se entrega, para cada punto normativo, el objetivo que cumple el personal que debe estar a cargo de su cumplimiento, y el método para llevarlo a cabo. Los puntos normativos son: Clasificación de peligros; Diseño y Construcción; Evaluación de la ruptura de la presa; Operación; Administración; Monitoreo y auditorías; Planes de emergencia y Cierre.

En la Ley de Minería de 1978, el plan de cierre será conceptual en la etapa de diseño, pero cada vez más detallado a medida que avanza la vida de la mina, debiendo adaptarse a cambios operacionales, nuevas regulaciones y nuevas tecnologías. El diseño inicial de los depósitos debe incluir levantamiento, monitoreo e instrumentación para verificar suposiciones de desmantelamiento antes del abandono de las instalaciones. Los objetivos del cierre son: dejar la instalación segura, estable, resistente a la erosión y no contaminante, para que no haya necesidad de mantenimiento continuo.

La ANCOLD preparó la guía llamada “Guidelines on Tailings Dam Design, Construction and Operation” en 1999, la cual entrega un documento base único aplicado para ejecutar el diseño y construcción de depósitos de relaves de acuerdo con la práctica recomendada. Como guía, el personal encargado debe continuar aplicando sus propias

consideraciones, juicios y habilidades ingenieriles en el proceso de diseño y control de embalses de relaves. Proporciona una base técnica coherente y completa. Propone además el desarrollo de un enfoque sistemático para la disposición de relaves en todas sus etapas, destacando la mejora continua y el monitoreo como principios fundamentales. (Fundación Chile, 2018a)

Si bien esta guía es específica a embalses relacionados con almacenamiento, los problemas requieren la consideración de estrategias de eliminación de residuos, procedimientos operacionales y el desarme o cierre. Estas consideraciones se describen en la guía, pero no son necesariamente exhaustivas para todas las posibles combinaciones de almacenamiento de relaves. (Fundación Chile, 2018a)

Sobre el monitoreo, mencionan que:

- Se deben controlar las características de los relaves a lo más cada 6 meses, para asegurar operaciones y desempeño.
- Existen 3 categorías de instrumentación y monitoreo: previa al diseño; durante construcción y operación y durante el proceso de rehabilitación.
- Se deben guardar registros y organizarlos para cubrir: monitoreo de agua subterránea, monitoreo de agua superficial, monitoreo de movimientos y grietas en el muro y auditorías anuales.

Este documento ha sido complementado durante 10 años, publicando su última edición en mayo de 2012 y el nombre ha cambiado a “Guidelines On Tailings Dams – Planning, Design, Construction, Operation And Closure” (ANCOLD, 2012).

2.7.4. Estados Unidos

Para la autorización de construcción de depósitos de relaves en los Estados Unidos, no existe una agencia con competencia a nivel nacional. De todos modos, cualquier proyecto que genere perturbaciones que supere un “uso ocasional” debe presentar un plan de operaciones que debe ser aprobado por la Oficina de Administración de Territorios o por el Servicio Forestal. Cada estado realiza en forma independiente una revisión de las consecuencias ambientales. Para el cierre del proyecto, existen parámetros para la recuperación de territorios, que incluyen medidas de control de la erosión, protección del agua, control de sustancias tóxicas, reforestación, entre otros exigidos por la guía de lineamientos (“Solid Minerals Reclamations Handbook”), establecida por la Oficina de Administración de Territorios. En algunos estados, las exigencias de cierre son reguladas por las directrices de seguridad de presas elaboradas por la Agencia FEMA, encargada del manejo de emergencias federales, y en otros, por reglamentos sobre protección de aguas subterráneas y acuíferos (SERNAGEOMIN, 2018c).

Sobre estabilidad física, Estados Unidos sigue las directrices entregadas por organismos internacionales como ICOLD, USSD, estándares de la Unión Europea, entre otros (SERNAGEOMIN, 2018c).

La “National Environmental Policy Act” de 1969 (NEPA) es la principal ley ambiental asociada a minería en los territorios federales. Establece la obligación de realizar estudios de impacto ambiental en proyectos que puedan afectar al medio ambiente. (SERNAGEOMIN, 2018c)

En 1994, la EPA publica el reporte técnico “Design and Evaluation of Tailings Dams”, en el cual se presentan características generales de depósitos de relave, mencionando los efectos que tienen ciertos factores (topográficos, climáticos, geológicos, entre otros) y los requerimientos reglamentarios relacionados con la seguridad y el efecto medioambiental, en el diseño de los depósitos. Contiene aspectos técnicos sobre el diseño, construcción, la gestión del agua y los posibles tipos de falla para tranques de relaves. Este reporte entrega información con respecto a los siguientes temas (Fundación Chile, 2018a; EPA, 1994):

- Métodos de disposición de relaves y tipos de depósitos.
- Conceptos básicos de diseño.
- Construcción, estabilidad y falla de los depósitos de relaves.
- Manejo y control del agua.

La MSHA publicó en mayo de 2009 el “Engineering and Design Manual Coal Refuse Disposal Facilities”. Corresponde a una guía sobre procedimientos a utilizar en diseños de ingeniería, monitoreo de construcción, operación e inspección de embalses y terraplenes de carbón en Estados Unidos. Sin embargo, se aplica a todo desecho generado en actividades mineras. La intención de este manual es servir de guía uniforme para las prácticas seguras de desechos involucrados en minería y presenta información, métodos y procedimientos recomendados a los diseñadores, operadores y revisores. El documento presenta un capítulo completo dedicado al Monitoreo, Inspección Y Mantenimiento de la Instalación y otro a la Instrumentación y Monitoreo del Rendimiento (SERNAGEOMIN, 2018b).

Entre otras cosas, mencionan que (MSHA, 2010):

- Las inspecciones normalmente incluyen observaciones visuales, recolección de datos físicos, lecturas de instrumentos, mediciones de flujo (si aplica) y la evaluación de la información registrada.
- Se recomienda que el monitoreo e inspección sean realizadas por un “profesional competente” con conocimientos de diseño (incluyendo criterios de seguridad de la estructura) y que sea parte de las especificaciones técnicas y planes de construcción.
- Instrumentación típica para la mayoría de las instalaciones suelen incluir monolitos topográficos, piezómetros, pozos de monitoreo y presas o canales.
- Los datos monitoreados típicos y los tipos de instrumentos más típicos son:
 - Desplazamientos verticales y laterales en superficie mediante monolitos.
 - Niveles piezométricos y presión de poros en muro y suelo de fundación utilizando piezómetros y piezómetros de cuerda vibrante.
 - Flujos de agua superficial provocados por filtraciones y descargas de minas mediante vertederos.
 - Desplazamientos verticales y laterales subsuperficiales en situaciones de condiciones adversas (por ejemplo, deformación y asentamientos taludes) mediante extensómetros e inclinómetros.
 - Condiciones meteorológicas en o cerca de la instalación utilizando estaciones meteorológicas (principalmente medidores de lluvia).
- Los planes deberían incluir (1) tipos de instrumentos y métodos de instalación, (2) requisitos de rendimiento y mantenimiento, (3) métodos de adquisición de datos,

(4) intervalos de muestreo e informes, y (5) rangos de medición esperados, incluyendo niveles apropiados de acción y de advertencia de peligro.

FEMA, en conjunto con la National Dam Safety Review Board, desarrollaron el programa de investigación The National Dam Safety Program, que consiste en la investigación para mejorar la capacidad de la Nación para asegurar que los programas de trabajo y las prácticas sean adecuados para la seguridad de una presa. El programa busca desarrollar y apoyar lo siguiente (Fundación Chile, 2018a):

- Técnicas mejoradas, experiencia histórica y equipos para la construcción, rehabilitación e inspección, para que sean rápidas y efectivas.
- Dispositivos para la vigilancia continua de la seguridad de las presas.
- Desarrollo y mantenimiento de los sistemas de información necesarios para apoyar la gestión de la seguridad de las presas.
- Iniciativas para orientar la formulación de políticas eficaces y avanzar en mejorar en la ingeniería, seguridad y gestión de la seguridad de las presas.

2.7.5. Canadá

En Canadá, un proyecto minero no solo debe cumplir con la legislación ambiental provincial, sino también federal. El año 2014 hubo una falla en la mina Mount Polley de Imperial Metals Corp., ubicada en el Estado de Columbia Británica, el principal estado minero canadiense. A raíz de esto, las autoridades de este Estado actualizaron su Código de Salud, Seguridad y Reclamación para Minas y desde ese momento empezaron a incluir auditorías periódicas en los depósitos de relaves. A nivel federal, el gobierno canadiense puede interceder en aspectos regulatorios para el manejo de relaves, solo si involucran actividades relacionadas con aguas, con peces o actividades de navegación, también si corresponden a relaves de uranio, o bien, se relacionan con asuntos ambientales de interés internacional. Las jurisdicciones de estados canadienses requieren de una garantía financiera y de un plan de cierre aprobado, antes de que empiece la producción en la mina. Algunas provincias requieren que este plan de cierre sea archivado antes de que se lleven a cabo actividades de exploración, lo que retarda en muchos casos la inversión, pero asegura en mayor medida el respeto de las normas que la regulan (SERNAGEOMIN, 2018c).

En relación a guías, las directrices canadienses (MAC y CDA), cuando se toman juntas representan el marco nacional más completo. Luego del incidente de Mount Polley (2014), la provincia de Columbia Británica realizó un cambio en el código minero definiendo el rol del Ingeniero de Registro (Engineer of Record) y cuando es necesaria una auditoría externa. De acuerdo a lo anterior, el empresario minero debe contratar a un ingeniero autorizado y registrado en un listado oficial, cuya función es garantizar que todo lo relacionado con el depósito de relaves sea conforma a la ley y a los reglamentos aplicables. Esto marca precedentes en lo que se considera como una buena práctica (ICMM, 2016; SERNAGEOMIN, 2018c).

“Dam Safety Guidelines” de 2007 de CDA (última actualización: 2013) (DSG-Ca) detalla el monitoreo general, inspecciones visuales, instrumentación en el depósito y la documentación y seguimiento (CDA, 2007).

En 2011, MAC publica “Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities”. Tiene por objetivo entregar guías

adicionales para preparar manuales de operación segura, mantención y monitoreo de depósitos de relaves y de aguas. Se indica que estas etapas deben ser parte integral de un sistema de gestión, que permita cumplir con las regulaciones gubernamentales y con las políticas corporativas de las compañías, así como demostrar el compromiso de mejora continua en la seguridad de empleados, medioambiente y comunidad en general (MAC, 2011; Fundación Chile, 2018a).

Presentan una tabla con los parámetros a controlar, como: observaciones visuales de superficie (grietas, vegetación, subsidencias), erosión de talud, niveles de agua, filtraciones, pendientes de la playa; y la instrumentación utilizada, como: deslizamientos de talud mediante monolitos topográficos, inclinómetros, presiones de poros mediante piezómetros, monitoreo sísmico, niveles de agua, entre otros. Además, menciona que se deben entregar una lista completa de toda la instrumentación con su identificación, ubicación, frecuencia de monitoreo y formas de manejo y almacenamiento de la información (MAC, 2011).

MAC también publicó, en su última versión 3.1 de 2019, “A Guide to the Management of Tailings Facilities” su “manual buenas prácticas en el manejo seguro y ambientalmente responsable de los depósitos de relaves.” Tiene por objetivos (Fundación Chile, 2018a):

- Entregar información sobre el manejo seguro y responsable de los depósitos de relaves.
- Ayudar a las compañías a desarrollar sistemas de manejo de residuos que incluyan criterios de seguridad y medioambientales.
- Mejorar la aplicación de los principios de ingeniería y gestión de las instalaciones de residuos.

Canadá es el único país de los revisados que ha desarrollado una iniciativa para hacerse responsables de las minas huérfanas y abandonadas, llama NOAMI (National Orphaned/Abandoned Mines Initiative). Las definen como minas donde el dueño no puede ser encontrado o que es incapaz o no está dispuesto a remediar el sitio.

En sus inicios (2002-2008), el trabajo se centró en la remediación y administración a largo plazo de sitios existentes. A partir de 2009, han examinado los planes de cierre y abandono, e identificado las mejores prácticas para prevenir la ocurrencia de futuros abandonos (Tremblay y Hogan, 2016).

Desde su creación en 2002, han creado grupos para trabajar en los siguientes temas clave (Tremblay y Hogan, 2016):

- Inventario Nacional Web de minas huérfanas y abandonadas.
- Compromiso de la comunidad.
- Barreras legislativas e institucionales para la colaboración.
- Enfoques de financiación.
- Revisión legislativa jurisdiccional.

2.7.6. Organismos Internacionales

La Comisión Europea (EC) publica en enero de 2009 “Reference Document on Best Available techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities”. El documento busca presentar actividades que son consideradas como “buenas prácticas”

en el manejo de minerales con potencial de generar impactos potenciales al medio ambiente. Presentan planes de monitoreo de diferentes depósitos de relaves, donde detallan el parámetro de control, el instrumento utilizado y la frecuencia con la que se mide, algunos de los cuales se muestran a continuación (EC, 2004)

- Control del nivel freático y presión de poros en la cubeta y muro mediante piezómetros con diferentes frecuencias
- Movimientos en el muro mediante inclinómetros y puntos de control
- Estabilidad de taludes mediante inspecciones visuales rutinarias, excepcionales (después de lluvias)
- Propiedades del relave y subsuelo mediante CPT, CPTU, entre otros
- Condiciones meteorológicas
- Actividad sísmica inducida por la explotación minera mediante acelerómetros

En otra operación, controlan los movimientos en el coronamiento y en los taludes, la presión de poros en el núcleo del muro y niveles de agua en la fundación.

En la Tabla 2.6 se encuentran las sugerencias de esta guía de las mejores técnicas disponibles para el monitoreo de estabilidad de depósitos de relaves.

El ICMM desarrolla la guía “Review of Tailings Management Guidelines and Recommendations for Improvement”, que corresponde a una revisión de normas, directrices y controles de riesgos de las instalaciones de depósitos de relaves. Fue dirigida por el ICMM e incluyó expertos externos y representantes de empresas miembros. Contiene las lecciones aprendidas del pasado, reflexionando sobre las recientes fallas catastróficas. Además, se centra en las buenas prácticas realizadas en diferentes partes del mundo, además de hacer una comparación entre las guías de distintos países (Fundación Chile, 2018a).

La ICOLD en 2001 publica el boletín 121 titulado “Tailings Dams: Risk of Dangerous Occurrences. Lessons learnt from practical experiences” donde recopilan 221 expedientes de casos de fallas e intentan determinar las causas de los incidentes. Esta guía tiene por objetivo destacar y aprender de experiencias del pasado, con el objetivo de evitar dificultades y fallas similares que ya han ocurrido (Fundación Chile, 2018a; ICOLD, 2001).

Tabla 2.6 Mejores técnicas disponibles sugeridas para el monitoreo de estabilidad de depósitos de relaves (Adaptado de EC, 2004)

Monitoreo de cubeta y muro	Nivel de agua Calidad y cantidad de líneas de flujo dentro del muro Posición del nivel freático Presión de poros Movimientos del coronamiento y relaves Sísmicidad Presiones de poro dinámicas Procesos de depositación de relaves
También se sugiere realizar	Inspecciones visuales Revisiones anuales Auditorías independientes

2.7.7. Análisis sobre Antecedentes normativos y buenas prácticas

En relación al Capítulo 2.7, es posible concluir que:

- Existe un interés de los Estados de regular la disposición de los relaves en estructuras seguras, en relación a la estabilidad tanto física como química, en todas las etapas del ciclo de vida de la mina (construcción, operación y cierre). Se han creado guías y reglamentos que regulen la elección del sitio de emplazamiento, el diseño, construcción, operación, mantención, monitoreo, instrumentación y cierre de depósitos de relaves.
- Se observa que se repiten consistentemente las variables sugeridas a monitorear y los sistemas de instrumentación. Se resumen en la Tabla 2.7.
- Constituir una garantía financiera y un plan de cierre aprobado se considera una buena práctica para asegurar la ejecución del plan de remediación.
- Existe similitud entre legislaciones peruanas y chilenas, debido al parecido de las condiciones geotectónicas. De los países revisados, Chile y Perú prohíben la construcción mediante el método aguas arriba.
- Con la normativa y buenas prácticas vigentes, es difícil la aparición de nuevos depósitos de relaves abandonados.

El proyecto canadiense NOAMI constituye la única iniciativa revisada que tiene relación con minas abandonadas y huérfanas. Trabajan con el sitio minero en general, pero destacan los depósitos de relaves abandonados como uno de los problemas medioambientales más serios de este tipo de obras. En este trabajo recomiendan un inventario de minas huérfanas y abandonadas que incluya todos los sitios inactivos minerales, sea en línea y tenga una interfaz de mapa. En Chile, esta información se encuentra, para los depósitos de relaves, disponible en la página web del SERNAGEOMIN y detallado en el Catastro (SERNAGEOMIN, 2019A).

Tabla 2.7 Variables a monitorear y sistemas de instrumentación reiterados en la literatura (Elaboración propia).

Variables a monitorear		Sistemas de instrumentación
<ul style="list-style-type: none"> - Presión de poros - Nivel freático - Desplazamientos - Asentamientos diferenciales - Filtraciones - Aceleraciones sísmicas - Densidad in-situ - Granulometría - Revancha - Ángulo del talud 	<ul style="list-style-type: none"> - Pendiente de playa - Nivel y posición de laguna de aguas claras - Inspecciones visuales de grietas, fisuras, vegetación, erosión del talud, entre otros. - Flujos de agua superficial y subterránea - Condiciones meteorológicas - Ejecución de Plan de Cierre (erosión eólica, evacuación de aguas lluvias, reforestación, control de sustancias tóxicas) 	<ul style="list-style-type: none"> - Lista completa de instrumentación instalada, junto a identificación, ubicación, frecuencia de monitoreo, formas de manejo y almacenamiento de la información; rangos de medición esperados. - Uso de: monolitos topográficos, inclinómetros, piezómetros, piezómetros de cuerda vibrante, monitoreo sísmico, estaciones meteorológicas

2.8. Instrumentos utilizados en depósitos de relaves

La instrumentación, en específico la instrumentación geotécnica, tiene como finalidad determinar las propiedades in-situ del suelo o roca y monitorear el comportamiento de obras. Proveen de información en todas las etapas de un proyecto, tanto en el diseño como en la construcción y operación de obras. Acorde a Gesche (2017), existen tres caminos para encontrar respuestas a problemas geotécnicos:

1. Análisis de muestras de suelo o roca, que incluye la extracción de muestras, descripción litológica, ensayos de laboratorio e interpretación de parámetros,
2. Determinación de propiedades in-situ, y
3. Pruebas de carga y monitoreo del comportamiento de obras.

En la presente sección se describen los instrumentos, ensayos y tecnologías utilizadas para el monitoreo geotécnico de depósitos de relaves, prestando especial atención a las herramientas relevantes en depósitos de relaves abandonados.

Debido a la restricción de recursos y ausencia de personal en terreno, se presentan las herramientas de instrumentación no invasiva, como lo son las imágenes satelitales, interferometría y los modelos de elevación digital. Por su extensiva aplicación y conocimiento, el detalle de la instrumentación más tradicional se expone en los Anexos. En el Anexo C se describe la propuesta de instrumentación invasiva, como piezómetro, inclinómetro, acelerógrafo y monolitos de control topográfico, mientras que en el Anexo D, la propuesta de ensayos de terreno, como ensayos geofísicos, de potencial eléctrico, penetrómetros, entre otros.

Se entiende por instrumentación al conjunto de equipos, tecnologías y procedimientos que permitan medir variables físicas para su archivo, evaluación y actuación. En este caso, para medir los parámetros críticos mencionados en el grupo 5 de la Tabla 2.4.

La instrumentación revisada se clasifica en dos:

- Instrumentación invasiva: irrumpe en el lugar y destruye o modifica el objeto medido.
- Instrumentación no invasiva: no irrumpe en el lugar y, por ende, no destruye ni modifica el objeto medido.

La instrumentación invasiva se describe en el Anexo C mientras que la no invasiva, se describe en el apartado 2.8.1 más adelante.

2.8.1. Instrumentación no invasiva

Como se menciona previamente, la instrumentación no invasiva no requiere la irrupción en el lugar de medición ni la destrucción ni modificación del objeto medido, vale decir, se realizan de manera remota. A continuación, se presentan los tipos de instrumentación no invasiva propuestas para este trabajo.

2.8.1.1. Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales corresponden a una representación visual capturada por un sensor montado en un satélite artificial, vale decir, desde el espacio.

Las imágenes satelitales utilizadas en este trabajo para la visualización remota de los depósitos de relaves abandonados corresponden al mapa base “Imágenes” del programa ArcMap 10.5 y a la colección de imágenes históricas de diferentes satélites disponibles en Google Earth Pro. En ambos casos, las imágenes provienen del satélite Landsat 8, que posee una resolución espacial de 15 metros (Ariza, 2013).

Existen la posibilidad de comprar imágenes satelitales o de drones con mayores resoluciones. Una las alternativas para la compra de estas imágenes, Geocento, posee una plataforma online para adquirir imágenes, tanto gratis como pagadas con resoluciones de hasta 0,31 metros por pixel.

2.8.1.2. Interferometría

La interferometría SAR (INSAR) y su variante, la interferometría diferencial SAR (DInSAR), son técnicas basadas en el proceso y análisis de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR). Los SAR son sensores activos que registran imágenes de alta resolución espacial, que iluminan un objetivo con una señal electromagnética (microonda) y la onda reflejada es ocupada para deducir información. El procesamiento de la señal usa la magnitud y fases de la señal recibida sobre sucesivos pulsos para crear una imagen (Bürgmann, Rosen y Fielding, 2000; Sillerico et al., 2010).

La nitidez de las imágenes está determinada por la apertura del lente, vale decir, el ancho de la antena. Como no es posible una antena del tamaño necesario, se genera una apertura sintética mediante el análisis de imágenes obtenidas por el satélite en diferentes momentos por su camino. El procesamiento de la señal usa las magnitudes y fases de la señal recibida sobre sucesivos pulsos para crear una imagen.

La técnica InSAR mide las diferencias de fase entre el satélite y la tierra en dos pasos del satélite por la misma zona. Estas diferencias pueden deberse a la diferencia de posición entre las trayectorias del satélite, hecho que permite medir la topografía de terreno; o deberse a un desplazamiento de la zona observada, causado, entre otros, por una subsidencia o un terremoto.

La interferometría SAR diferencial (DInSAR) es una técnica de proceso de imagen que permite la generación de mapas de desplazamiento de terreno y el cálculo de coherencia relativa, a partir de n pasos del sensor SAR por una misma zona de estudio. El análisis DInSAR puede aplicarse a pares de imágenes a lo largo del tiempo, para obtener movimientos de varios meses o años. Mediante esta técnica se puede eliminar la deformación asociada a la mezcla de la deformación y la señal topográfica, y se utiliza para detectar y medir movimientos muy pequeños en la superficie (Sillerico et al., 2010).

En la literatura se detalla la metodología de estas técnicas y describen aplicaciones en minería y construcción (Zebker et al., 1997; Massonnet y Fiegl, 1998; Sillerico et al., 2010; Ng et al., 2017; Sánchez, 2018; Mitchell et al., 2018; Duro et al., 2018, entre otros).

Como se menciona previamente, para obtener un interferograma diferencial, se necesitan dos imágenes de radar de apertura sintética, ya sea preprocesado o producido por InSAR, Estas imágenes se pueden obtener de satélites (como los detallados en Sillerico et al., 2010), u otras fuentes, como drones o equipos terrestres equipados con radares. Además, se necesitan softwares para el procesamiento de estas imágenes. Entre los programas gratuitos, se encuentra I.D.I.O.T. (Reigber et al, 2007). Este programa utiliza

datos del satélite ENVISAT-ASAR, disponibles también de manera gratuita, para generar fácilmente interferogramas diferenciales.

Las ventajas que entregan estos sistemas por sobre las técnicas ópticas para el monitoreo de fenómenos rápidos son (Massonnet y Fiegl, 1998):

- Monitoreo constante de áreas de difícil acceso. Además, el acceso al registro histórico de imágenes satelitales permite formar una línea de tiempo de la construcción, operación y cierre de depósitos de relaves.
- Las ondas se propagan a través de medios atmosféricos (nubes, niebla, humo, aerosoles) sin pérdidas notables de señal, proporciona imágenes sin importar el clima o la presencia de luz solar.
- Los mapas generados proveen una densidad de muestreo insuperada (~100 píxeles por km), una precisión competitiva (~1 cm) y una frecuencia de observación útil (1 paso por mes).

Las limitaciones de estas técnicas se producen en su mayoría debido a decorrelación temporal y geométrica. La decorrelación temporal hace que las mediciones interferométricas sean infactibles donde los perfiles electromagnéticos y/o las posiciones de los puntos de referencias cambien en el tiempo dentro de una celda de resolución. Lo menos controlable de los aspectos asociados a la interferometría para un sensor dado son la decorrelación temporal y errores sistémicos de fase inducidos por efectos de propagación o por algoritmos de lectura de fase.

Mediante esta técnica es posible:

- Caracterizar topográficamente un lugar, por medio de modelos de elevación digital (DEM).
- Medir desplazamientos de superficie con precisiones milimétricas al analizar imágenes de diferentes momentos desde la misma posición de la antena. Es posible observar diferencias de fase que se pueden atribuir a un movimiento hacia o en sentido opuesto de la antena.
- Identificar presencia de agua (fugas, sumideros, niveles y efluentes).

Esta tecnología es usada para monitorear movimientos de “ground motion” en minas chilenas desde 2009, siendo pioneros a nivel mundial. En el depósito de relaves Talabre de Chuquicamata (CODELCO), se controló durante 8 meses el comportamiento del depósito. Se obtuvieron 22 imágenes cada 11 días en la misma área, con una precisión milimétrica en 31 km². Entre otras aplicaciones de encuentra el depósito de relaves en Suncor Millenium Mine en Alberta, Canadá (Mitchell et al, 2018) y el estudio de falla del depósito Fundão de la empresa Samarco ocurrida en noviembre de 2015, Brasil (Duro et al, 2018).

2.8.1.3. Modelos de elevación digital (DEM)

Un Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés) forma parte de la familia del Modelo Digital de Terreno (DTM, por sus siglas en inglés), y se definen como una “representación digital de la altitud como variable continua sobre una superficie bidimensional, a través de una red regular de valores Z referenciados a un dátum común” (Roa y Kamp, 2008).

Las superficies se suelen modelar con datasets ráster. Un ráster es una matriz de celdas, también denominadas píxeles, organizadas en filas y columnas y que cubren alguna región del mundo. Cada celda de una matriz representa una unidad de área cuadrada y contiene un valor numérico que es una medida o una estimación correspondiente a esa ubicación. Cuando se observa un modelo digital de elevación (DEM) en un mapa, no se ve una matriz de celdas. En lugar de eso, se ve una capa simbolizada con una rampa de color u ocupar efectos especiales, como el sombreado, para simular el relieve. Las herramientas de análisis que se pueden ejecutar en los DEM pueden producir nuevas superficies, como pendientes y orientaciones. También para estudiar propiedades de la superficie, como la visibilidad y el flujo de agua (ArcGIS, 2017).

Los DEM se pueden generar a partir de “mapas topográficos, fotografías aéreas, datos de radar, como los suministrados por el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), sistemas láser, como los del sistema Light Detection and Ranging (LIDAR), o de imágenes satelitales estereoscópicas. Estas últimas se representan por sistemas electro-ópticos procedentes del Système Probatoire d’Observation de la Terre (SPOT) o del Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), los cuales usan imágenes satelitales en lugar de fotografías aéreas, cubriendo áreas mucho más extensas en una simple toma” (Roa y Kamp, 2008).

Actualmente existen dos técnicas para obtener DEM desde sistemas satelitales. Una se refiere al uso de imágenes satelitales estereoscópicas provistas por sensores ópticos satelitales; la otra se basa en el uso de datos provistos por sistemas de radar satelitales, ya sean de apertura sintética (SAR) o apertura sintética interferométrica (InSAR) (Roa y Kamp, 2008). Las resoluciones existentes para estas técnicas se encuentran entre 0,61 a 30 metros por pixel. ASTER, plataforma gratuita, posee una resolución de 15 metros por pixel, mientras que QuickBird, un satélite comercial propiedad de DigitalGlobe (Colorado, Estados Unidos), entrega DEM de resolución de 0,61 metros por pixel.

El 2014 en Chile, el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) genera un DEM de alta resolución para la región de O’Higgins por medio de imágenes ASTER e información en terreno mediante un equipo GPS, cuya resolución es de 5 cm por pixel.

Existe una gran diversidad de programas que permiten crear modelos digitales de elevación. Sin embargo, los más comunes son Surfer, IDRISI y las extensiones Spatial Analyst y 3D Analyst de ArcView. (Thoen, 1997; Eastman, 1998; ESRI, 1996; 1997b).

2.9. Estudios de entorno regional

Existen factores externos al depósito de relaves que pueden afectar su estabilidad física, tal como se menciona en el grupo 6 de la Tabla 2.4 y en la Tabla 2.7. Estos factores están relacionados con la sismicidad de la zona de emplazamiento, cuya unidad de medida son las aceleraciones sísmicas; con los flujos de agua superficial y subterránea, medidas en lluvias y crecidas, y las condiciones meteorológicas, controlando el régimen de los vientos.

En la siguiente sección, se describen los contenidos mínimos para un estudio de riesgo sísmico (sección 2.9.1) y para un estudio hidrológico (sección 2.9.2). Además, en la sección 2.9.3 se detallan los procedimientos de un análisis de estabilidad de taludes.

2.9.1. Estudio de Riesgo Sísmico

Tal como se menciona en el punto 2.4, en Chile los incidentes en depósitos de relaves están dominados por eventos sísmicos de gran magnitud. Es de vital importancia el poder evaluar el riesgo sísmico de cada depósito de relave.

A nivel nacional, no existe un documento establezca los contenidos mínimos de un estudio de riesgo sísmico. Sin embargo, el estado del arte de éstos se puede resumir en:

1. Descripción del área de estudio: ubicación, información geológica, catálogo de sismos registrados en la zona (magnitud y periodo de retorno por definir)
2. Evaluación de la amenaza sísmica: ambiente sismotectónico (fuente sismogénica que domina (Figura 2.6) y sismos importantes asociados a cada fuente), ambiente geológico-geotécnico (marco geológico, incluyendo fallas geológicas y su estado de actividad, descripción del suelo de fundación y el tipo de suelo según NCh 433), sismicidad histórica individualizada por fuente sismogénica, caracterización de las fuentes sísmicas (relación de Gutenberg-Richter), ley de atenuación y análisis del cálculo de riesgo sísmico, que puede ser probabilístico y/o determinístico.

El análisis probabilístico asume una discretización de todas las fuentes potenciales de generación de eventos sísmicos que producen un efecto significativo sobre la respuesta del suelo en un sitio específico y el objetivo es determinar la probabilidad de ocurrencia de cada combinación incluyendo efectos tales como la incertidumbre en las relaciones de atenuación. Por su parte, el análisis determinístico propone aceleraciones del suelo mediante la recreación de escenarios sísmicos posibles y/o la selección de sismos históricos, que, por su cercanía al sitio en estudio, generan movimientos significativos del suelo.

3. Caracterización de la excitación: obtención de un espectro elástico de diseño para aceleración horizontal. Este espectro es el dato de entrada para los análisis de estabilidad física de taludes.

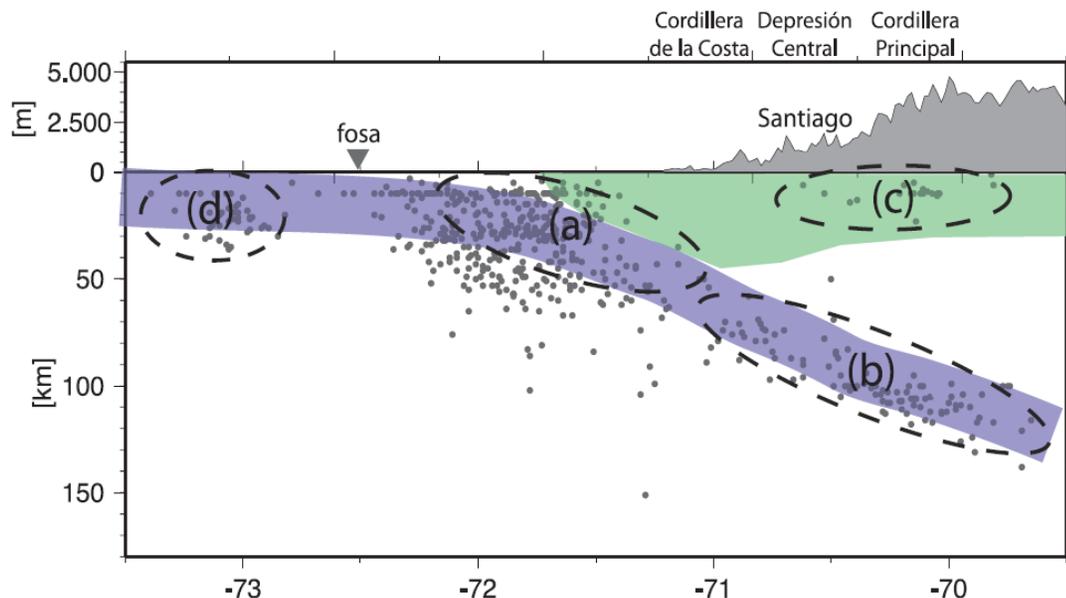


Figura 2.6 Perfil esquemático de las fuentes sismogénicas de Chile: (a) interplaca tipo "thrust", (b) intraplaca de profundidad intermedia, (c) corticales y (d) "outer-rise". (CSN, 2014)

2.9.2. Estudio Hidrológico

Un estudio hidrológico tiene por objetivo conocer los caudales máximos de un cauce (crecida) a partir del estudio del régimen de lluvias máximas y la caracterización del territorio. Para ello, es necesario:

- Determinar curvas de intensidad, duración y frecuencias (Análisis de régimen de precipitaciones).
- Definir el régimen climático.
- Determinar las características físicas de la cuenca (superficie, forma, pendiente, longitud del cauce principal, materiales, usos del suelo, coeficientes de escorrentía y tiempos de concentración).
- Determinar caudales máximos, las precipitaciones medias y máximas.

De manera general, el informe debe contener:

- Descripción del área de estudio: ubicación, geología y fisiografía.
- Definición de cuencas y subcuencas hidrográficas aportantes: describir sus características, morfometría, índices característicos, tipo de suelo, presencia de vegetación, clima, temperatura, régimen de precipitaciones (medias, variación mensual y estacional), caudales (medios, mensuales y variaciones mensuales y estacionales) y el régimen de crecidas.

Para determinar los caudales máximos es necesario que un profesional experto defina un periodo de retorno, que debe quedar en función de la importancia del depósito.

La sección 3.702 “Hidrología” del Manual de Carreteras (2019) presenta las metodologías y criterios para estimar caudales de diseño de las obras de drenaje transversal de una carretera. Entrega criterios de diseño, explícita hipótesis, posibilidades de aplicación y limitantes a los métodos presentados. A pesar de ser otro tipo de obra civil, la metodología es aplicable.

En general, los procedimientos incluidos en el Manual permiten estimar los caudales causados por lluvias y no incluyen los escurrimientos provenientes de deshielos o cuencas cubiertas de nieve (Manual de Carreteras, 2019), por lo que, si el depósito de relaves abandonado se encuentra en una cuenca con esas características, el estudio hidrológico debe ser tratado por un especialista.

La DGA también presenta en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA, 1995) tres procedimientos para estimar crecidas en cuencas pluviales.

2.9.3. Análisis de estabilidad de taludes

El Artículo 14 del DS N°248 describe los antecedentes mínimos que debe ingresar el usuario que desee la aprobación del proyecto de un depósito de relaves. Entre ellos, en la letra o) del recién mencionado artículo, se describen los Análisis de Estabilidad de Taludes en sus etapas de operación y cierre, incluyendo “fases de precisión según la importancia y evaluación de riesgos que el depósito pueda presentar para las áreas adyacentes”, de la siguiente forma (Decreto Supremo 248, 2007):

- Fase I: Simulación de estabilidad estática (Análisis pseudo-estáticos) asumiendo licuefacción total de los relaves de la cubeta.
- Fase II: Simulación de estabilidad estática (Análisis pseudo-estáticos) con determinación simplificada de las presiones de poros.
El factor de Seguridad resultante del cálculo de las fases anteriores, no debe ser menor de uno coma dos (1,2). Para el caso de depósitos pequeños (con muros menores de 15 metros de alto) cumplida esta condición, no será necesario cumplir la fase III.
- Fase III: Análisis dinámicos basados en ensayos de propiedades dinámicas de los suelos, incluyendo cálculos de desplazamientos.
- Fase IV: Análisis para condición de Cierre, incluyendo eventos solicitantes máximos y efectos del tiempo en las propiedades de los depósitos.

Los análisis de estabilidad pueden clasificarse en dos categorías, descritos en la Tabla 2.8 a continuación.

Tabla 2.8 Análisis convencionales en el diseño de taludes (Escobar y Duque, 2016)

Enfoque	Análisis de Equilibrio Límite	Análisis de elementos finitos
Características	Bidimensional Tridimensional (cuña) Masa rígida o semirrígida	Bidimensional, Tridimensional. Material de comportamiento elástico lineal no lineal. Con o sin resistencia a la tracción Con o sin discontinuidades.
Datos de Entrada	Geometría Modo de falla: Translacional, rotacional, plana, cuña. Parámetros c , ϕ : de fluencia, pico, residual. Agua: empuje hidrostático, fuerzas de infiltración, presiones neutras.	Geometría. Campo de esfuerzos natural, roca: E , μ , c , ϕ . Discontinuidades: K_n , K_s , dilatancia, c , ϕ . Agua: Efecto de las presiones neutras.
Resultados	Factores de seguridad	Campo de esfuerzos, Campos de deslizamiento.
Limitaciones	No considera deformaciones	Por lo general, admite únicamente desplazamientos pequeños.

En el Anexo B de la “Guía metodológica para Evaluación de la Estabilidad física de Instalaciones Mineras Remanentes” se describen ambos análisis (SERNAGEOMIN, 2018b).

En general, se utiliza el método de equilibrio límite mediante algoritmos numéricos o códigos como los softwares MStabl, Clara, Slide, GeoSlope, SlopeW y otros. Utilizan el método de las dovelas que, sumados al enfoque de equilibrio límite, calculan factores de seguridad para una posible falla de superficies circulares o de bloque.

2.10. Criterios utilizados en la propuesta metodológica

En la siguiente sección se describen los criterios para categorizar los factores y parámetros expuestos en las secciones previas.

Se detallan los criterios relacionados con la tipología del depósito de relaves abandonado enfocándose en la existencia o ausencia de un muro de arena, la edad del depósito, la distancia a fallas geológicas, la actividad sísmica según la ubicación geográfica, crecidas y distancia peligrosa a volcanes activos.

2.10.1. Tipología de depósitos de relaves

Monsalve (2019) realiza un análisis satelital de tranques de relaves no operativos (inactivos y abandonados) situados entre la III y V Región de Chile, con un volumen inferior a 5.000.000 [m³]. Antes de estimar la altura de los depósitos, realiza dos análisis previos respecto a la morfología y al volumen mínimo de análisis.

Mediante observaciones de imágenes satelitales de cada uno de los depósitos, es posible establecer 7 categorías, descritas a continuación (Monsalve, 2019):

- Tipo 1: Tranque sin muro definido (Figura 2.7)
- Tipo 2: Tranque con muro definido de arena - zona posterior y/o lateral cerro natural (Figura 2.8)
- Tipo 3: Tranque con muro definido de arena - zona posterior y/o lateral cerro natural – colindante aguas abajo con otro depósito (depósito de la derecha en la Figura 2.9)
- Tipo 4: Tranque con muro definido de arena - Zona posterior y/o lateral otro depósito de relaves (depósito de la izquierda en la Figura 2.9)
- Tipo 5: Tranque con muro definido de arena en todo el perímetro (Figura 2.10)
- Tipo 6: Tranque construido colindante a otro(s), sin poder diferenciar los límites de cada uno (Figura 2.11)
- Tipo 7: No se observa adecuadamente a través de la imagen satelital.

Es importante destacar que esta clasificación es en función de la existencia de un muro de arenas definido, estructura encargada de dar gran parte de la estabilidad del depósito.



Figura 2.7 Depósito Tipo 1. Imagen satelital de Google Earth.



Figura 2.8 Depósito Tipo 2. Imagen satelital de Google Earth.



Figura 2.9 Depósitos Tipo 3 (derecha) y Tipo 4 (izquierda). Imagen satelital de Google Earth



Figura 2.10 Depósito Tipo 5. Imagen satelital de Google Earth



Figura 2.11 Depósito Tipo 6. Imagen satelital de Google Earth.

2.10.2. Envejecimiento de arenas

En 1990, Troncoso plantea que los efectos de envejecimientos de las arenas de relave dependen de las propiedades de los componentes más finos y de las reacciones físico-químicas entre los sólidos y fluidos que generan uniones en la estructura, que se fortalecen con el tiempo. Además, existe un aumento natural de la resistencia debido a la consolidación, desecación y densificación inducida por la historia sísmica chilena.

En un trabajo previo (Troncoso et al., 1988) investiga la resistencia cíclica de muestras inalteradas en el depósito de relaves abandonado El Cobre, Chile Central. En la Figura 2.12 se exhibe claramente un aumento de la resistencia con la edad.

Con estos resultados, Troncoso plantea que un aumento de resistencia cíclica reduce el potencial de licuefacción y que la cimentación aumenta la resistencia a la erosión. Además, el aumento de rigidez implica un módulo de corte mayor y velocidades de onda de corte mayores. Todo esto tiene un efecto positivo en reducir las tensiones de corte sísmicas y, por ende, disminuir los riesgos de licuefacción y falla de flujo.

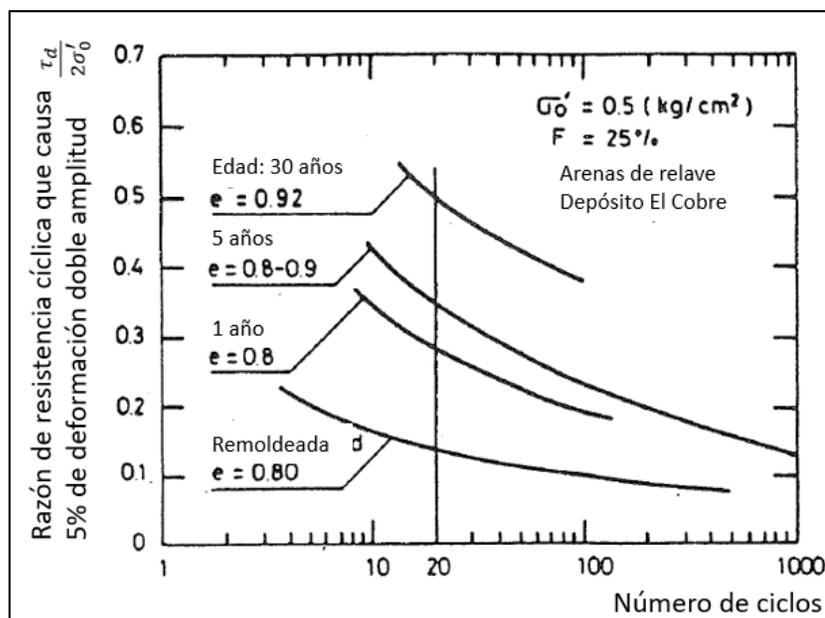


Figura 2.12 Efecto del envejecimiento en arenas limosas de Troncoso, Ishihara y Verdugo, 1988 (Modificado de Troncoso, 1990)

2.10.3. Distancia a fallas geológicas

Mardones y Vidal (2001) realizan una zonificación y evaluación de los riesgos naturales geomorfológicos para generar un instrumento de planificación urbana en la ciudad de Concepción, VIII Región. Entre los riesgos estudiados, realizan una zonificación para el riesgo sísmico y entregan una matriz de evaluación de riesgo sísmico (peligrosidad) acorde a cinco factores: litología, cercanía a la zona de falla, pendiente topográfica, posición del nivel freático y la presencia de relleno artificial. En la Tabla 2.9 se presenta la clasificación que las autoras plantean para la distancia a fallas geológicas.

Tabla 2.9 Fragmento de Matriz de evaluación de riesgo sísmico (peligrosidad) (Modificado de Mardones y Vidal, 2001)

Evaluación/factores de riesgo	1	2	3
Estructuras (cercanía a la zona de falla)	Mayor a 200m de zona de falla	100-200m de zona de falla	Menor a 100 metros de zona de falla

Por otro lado, Muñoz (2013) desarrolla un índice de susceptibilidad de respuesta sísmica por presencia de fallas en áreas urbanas, para luego aplicarlo en la ciudad de Viña del Mar, V Región. En su trabajo, la autora le asigna un porcentaje en peso (en relación a otros ponderadores) de 20% al factor “Distancia de la unidad respecto a la traza(s)”, desglosado en la Tabla 2.10. Se destaca que se debe “considerar si la unidad es atravesada por una o varias trazas de la falla o la distancia que existe entre la traza(s) y la unidad”.

Tabla 2.10 Rango y Porcentaje para Distancia de la traza(s) de la falla(s) con respecto a la unidad de análisis (Modificado de Muñoz, 2013)

Rangos	Porcentaje [%]
Traza(s) de falla a menos de 50 metros de la unidad de análisis	20
Traza(s) de falla entre 50 y 150 metros de la unidad de análisis	10
Traza(s) de falla entre 150 y 250 metros de la unidad de análisis	5
Traza(s) de falla a más de 250 metros de la unidad de análisis	1

Es importante destacar el estado de actividad de la falla. Muñoz (2013) menciona que “los límites para definir si una falla es activa pueden ser variables, por ejemplo, en función de las condiciones tectónicas, o a partir de las leyes específicas de cada país, o en función de la vida útil y niveles de seguridad de un proyecto específico”.

2.10.4. Actividad sísmica

En el caso de la actividad sísmica, se opta por el uso de las zonas sísmicas definidas en la sección 4.1 de la norma chilena NCh433Of.1996 modificada en 2012.

En ella, se distinguen tres zonas sísmicas en el territorio nacional. En el caso de las regiones IV, V, VI, VIII, IX y Metropolitana, se hace una zonificación basada en la división política por comunas.

Esta división tiene asociada una aceleración efectiva, conocida como A_0 . Las zonas sísmicas 1, 2 y 3 tienen asociada una aceleración efectiva de $0,20g$, $0,30g$ y $0,40g$ respectivamente, con g equivalente a la aceleración de gravedad en la Tierra (aproximadamente $9,8 m/s^2$). Esto implica que la Zona 1 se encuentra sometida a una menor aceleración efectiva durante un sismo que la Zona 2 y 3.

2.10.5. Exposición a crecidas

En la Guía Metodológica para el Cierre de Faenas Mineras (SERNAGEOMIN, 2002) se reconoce el riesgo que puede ocasionar un evento hidrológico manifestado como la crecida de ríos, lluvias, avalanchas y aluviones. En la evaluación del cierre de un depósito de relaves, se debe estudiar la “estabilidad física de largo plazo manejando aguas de relaves y las de la cuenca aportante en forma controlada para evitar el exceso de filtraciones y erosión” y menciona que se debe incluir un “análisis de riesgo frente a crecidas e inundaciones”.

Mediante el Estudio Hidrológico (Sección 2.9.2) se obtienen los cauces máximos. Si sumado a este valor se considera un mapa topográfico, es posible calcular zonas de inundación en función de la inclinación del terreno y caudal máximo esperado.

2.10.6. Volcanismo

Chile alberga alrededor de 2900 volcanes, de los cuales 90 aun presentan algún tipo de actividad. El Departamento de la Red Nacional de Vigilancia Volcánica del

SERNAGEOMIN permite a las autoridades contar con información oportuna para gestionar emergencias volcánicas para asegurar la seguridad de la población.

Las amenazas volcánicas pueden ser diversas en origen y extensión. En el caso de los depósitos de relaves, los peligros más considerables son los asociados a la actividad volcánica en sí, como flujos de lava, flujos de lodo (lahares) y lluvias de piroclastos, y a la actividad sísmica de origen volcánico, sismos que pocas veces rebosan la magnitud 6 (SERNAGEOMIN, 2019b). Los flujos pueden perjudicar la estabilidad física del muro y cubeta, ya que pueden hacer perder material del muro resistente o aumentar el volumen contenido en el depósito. Por su parte, los sismos, aun pequeños, pueden propiciar algún mecanismo de falla, como la licuación sísmica.

En la página web del SERNAGEOMIN se dispone de mapas de peligro volcánico, que “identifica áreas expuestas al efecto directo e indirecto de posibles erupciones volcánicas, a través de diferentes formas y escalas de representación, que distinguen cada uno de los procesos posibles durante una erupción, y proponen una zonificación más simple e integrada” (SERNAGEOMIN, 2019b).

2.11. Recursos computacionales

Con el objetivo de complementar la información disponible en el Catastro de Depósitos de Relaves (SERNAGEOMIN, 2019a) se utiliza el programa ArcMap 10.5 para visualizar la ubicación y estado de los depósitos de relaves abandonados en Chile.

2.11.1. ArcMap 10.5

La plataforma ArcMap 10.5 es la aplicación central utilizada en ArcGIS, que se define como un sistema de información geográfica (SIG, o GIS por sus siglas en inglés) que admite la visualización y exploración de los dataset SIG de un área de estudio, donde se asigna símbolos y se crean y editan los dataset. Representa la información geográfica como una colección de capas y otros elementos de un mapa. Permite modelar, capturar, almacenar, manipular, transformar, analizar y publicar información geográficamente referenciada de manera de facilitar la representación de los objetos del mundo real en términos de posición, atributos y relaciones espaciales con el propósito de analizar estos datos y resolver problemas de diversa índole (ESRI, 2018b).

A continuación, se presentan las herramientas de este programa utilizadas para este trabajo.

2.11.1.1. Ubicación

Se crea un archivo Excel con las coordenadas de los depósitos de relaves abandonados obtenidos del Catastro (SERNAGEOMIN, 2019a) junto a un ID, que luego se importa al programa ArcMap.

Al mismo tiempo, se importan capas con diferentes áreas o puntos de interés, tales como cursos de agua, centros poblados y zonas de interés turístico, entre otras (detalladas en el Capítulo 3, Tabla 3.6 Nombre y descripción de capas (Albers, 2012; IDE, 2019).).

2.11.1.2. Áreas y observación general

Una vez ubicados los depósitos, se crea una figura “Shape” para delimitar la superficie en planta y calcular su área. Luego, se registra en el Catastro de Depósitos de Relaves Abandonados (Anexo B).

Además del cálculo de áreas, se observa y consigna en el Catastro de Depósitos de Relaves Abandonados si el depósito presenta un muro de arena claro, si se encuentra en grupo y si presenta derrame

2.11.1.3. Distancias

Mediante la herramienta “Generar tabla de cercanía” es posible “calcular las distancias y demás información de proximidad entre entidades en una o varias capas o clases de entidad” (ESRI, 2018a). Genera una tabla independiente nueva y permite la búsqueda de más de una entidad próxima. En la Figura 2.13 se grafica el funcionamiento de esta herramienta.

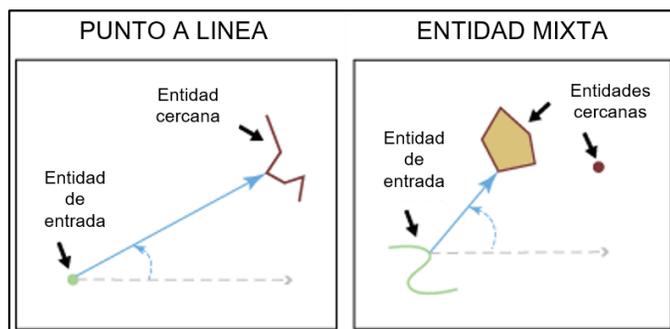


Figura 2.13 Funcionamiento de herramienta “Generar tabla de cercanía” de ArcMap 10.5 (ESRI, 2018a).

2.12. Conclusiones generales de la revisión de antecedentes

A nivel chileno y mundial, se ha definido qué es un relave y depósito de relaves, junto a sus tipologías (tipo de relave, de depositación y método constructivo) y componentes. También, se ha definido la estabilidad física como la situación de seguridad estructural que asegura el embalsamiento de este residuo dentro de una estructura contenedora. Existen amplias recopilaciones y estudios de las pérdidas de estabilidad física (incidentes), tanto a nivel mundial como a nivel nacional, donde la causa que domina ocurrencia de estos incidentes en Chile son los sismos. Villavicencio et al. resume las causas y factores comunes como:

- Ocurrencia de incidentes en tranques de relaves activos, abandonados o en cierre, contruidos mediante el método de aguas arriba con alturas máximas menores a 50 metros pertenecientes a mediana minería
- Relación de aspecto de talud de aguas abajo entre 1,2:1 y 1,7:1 (V:H) generados por simple depositación hidráulica de arenas de relaves cicloneadas
- Muro con alto contenido de finos y alto grado de saturación (causado por precipitaciones, inadecuado manejo de aguas superficiales y/o subterráneas)

Los procesos que generan la eventual pérdida de estabilidad del depósito de relaves se conocen como mecanismos de falla y se encuentran ampliamente descritos en la literatura. En el caso de los depósitos de relaves abandonados, las condiciones asociadas al emplazamiento y diseño, parecieran ser más importantes que las de operación y control, más que nada por la ausencia de información de éstas. Vale decir, que lo propuesto a continuación debe descifrar cuáles fueron las condiciones de operación y control, como las propiedades del material, el manejo del agua, el nivel de compactación y humedad, entre otros factores. Según la autora, los mecanismos de falla que dominan en los depósitos de relaves abandonados son la inestabilidad de taludes, rebalse y erosión interna. Para estos tres mecanismos de falla, los factores que se repiten son:

- Método constructivo aguas arriba
- Talud del muro saturado
- Arenas de relave del muro con las siguientes características: deficiente compactación, granulometría desfavorable, alto contenido de finos, susceptibilidad o resistencia a ser erosionado.
- Geometría desfavorable del muro (ancho de coronamiento, altura de revancha, pendiente del talud aguas abajo)
- Laguna de aguas claras cercana al muro

Los eventos gatilladores asociados a los mecanismos de falla descritos anteriormente se tratan de:

- Lluvias extremas y crecidas de cauces de agua que puedan generar cambios en el diseño original del depósito
- Sismos, de origen tectónico, volcánico o de operación de obras civiles.
- Aumento del contenido de humedad y variaciones en el nivel freático en el muro y cubeta

Los parámetros críticos relevantes en los depósitos de relaves abandonados son:

- Geometría del depósito de relaves: método constructivo, altura del muro, altura de revancha, posición de la laguna de aguas claras, pendiente de la playa, volumen embalsado, ancho del coronamiento, inclinación del talud aguas abajo.
- Geometría de la cuenca de emplazamiento
- Desplazamientos, subsidencias y asentamientos diferenciales en el muro y cubeta
- Aparición de grietas
- Nivel freático y presión de poros al interior del muro y en el suelo de fundación y sus posibles manifestaciones en superficies, como filtraciones o zonas húmedas
- Evidencias de humedad en talud de aguas abajo del muro, cubeta y estribos
- Características del material del muro, cubeta y suelo de fundación: granulometría, rigidez, resistencia al corte, plasticidad de fracción fina
- Nivel de compactación del muro

Es importante destacar que, si bien cualquier incidente ocurrido en un depósito de relaves es relevante por su impacto al medioambiente, la evaluación no es la misma si este ocurre en un lugar cercano a un asentamiento humano o un cuerpo de agua.

Por su parte, los sistemas de instrumentación se encuentran ampliamente estudiados y aplicados, en la mayoría de los casos, a depósitos de relaves con titulares conocidos (activos o inactivos) y, por lo tanto, con capacidad de inversión en recursos humanos y

tecnológicos. Se identifica la necesidad de utilizar herramientas que demanden poco capital y puedan ser aplicadas sin la necesidad de realizar visitas a terreno, por lo tanto, el uso de herramientas no invasivas y remotas se vuelve llamativa. Este tipo de tecnologías son utilizados en la actualidad, tanto para monitoreo de comportamiento de estructuras como para realizar estudios posteriores a incidentes en depósitos de relaves.

En relación a los criterios investigados para categorizar los diferentes aspectos de los depósitos de relaves abandonados, presentados en la sección 0, sólo corresponden a un primer acercamiento a los aspectos considerados relevantes por la autora. Éstos pueden ser eliminados, reemplazados o conservados, y en el caso de las diferentes categorizaciones propuestas, éstas pueden ser modificadas, castigadas o flexibilizadas. Todo esto debe ser determinado por un conjunto de profesionales expertos en diversas disciplinas (técnicas y sociales) y autoridades.

3. Clasificación de depósitos de relaves abandonados en Chile

En 2019, el Departamento de Depósitos de Relaves del Servicio Nacional de Geología y Minería publicó el *Catastro de Depósitos de Relaves*, disponible en la página web del servicio (SERNAGEOMIN, 2019a).

A abril de 2019, se catastraron 742 depósitos de relave, distribuidos entre la Región de Arica y Parinacota y la Región de Aysén. De éstos, 173 se encuentran abandonados. A continuación, se presenta la información relevante para comprender el estado de los depósitos de relaves abandonados en Chile, obtenida del Catastro y complementada por medio del programa ArcMap.

3.1. Distribución por región

En la Tabla 3.1 se muestra la distribución por región de los depósitos de relaves abandonados en Chile.

Se observa que se encuentran concentrados en la IV Región. Sin embargo, en esta región existe una gran cantidad de pequeños productores mineros que, a través de pequeñas plantas de procesamiento, generan relave en también pequeñas cantidades (Toro, 2017).

Tabla 3.1 Distribución de depósitos abandonados por región (SERNAGEOMIN, 2019a)

Región	Cantidad	Porcentaje
I (Tarapacá)	6	3%
II (Antofagasta)	16	9%
III (Atacama)	23	13%
IV (Coquimbo)	106	61%
Metropolitana	6	3%
V (Valparaíso)	11	6%
VI (O'Higgins)	1	1%
XI (Aisén)	4	2%
Total	173	100%

3.2. Distribución según tipo de depositación y método constructivo

En la Tabla 3.2 se muestra la distribución de depósitos de relaves abandonados según tipo de depositación y método constructivo. Se observa un predominio de los tranques de relaves sin información sobre el método constructivo (59,5%), seguido por tranques de relaves construidos por el método de aguas arriba (27,7%), los que representan el 87,3% de los depósitos de relaves abandonados en Chile.

Tabla 3.2 Distribución según tipo de depositación y método constructivo (SERNAGEOMIN, 2019a)

Tipo de depositación	Método constructivo	Total	Porcentaje del total
Embalse	Aguas arriba	3	1,7%
	Embalse	2	1,2%
	S/I	1	0,6%
Subtotal		6	3,5%
Tranque de relave	Aguas abajo	2	1,2%
	Aguas arriba	48	27,7%
	Eje central	10	5,8%
	Embalse	4	2,3%
	S/I	103	59,5%
Subtotal		167	96,5%
Total		173	100%

3.3. Distribución según recurso

La Tabla 3.3 muestra la cantidad de depósitos según tipo de recurso depositado. Se observa que el 56% corresponde a depósitos dominados por el cobre y el 42% está dominado por oro.

Tabla 3.3 Distribución según tipo de recurso (SERNAGEOMIN, 2019A).

Recurso	Cantidad	Porcentaje
Cobre	49	28,3%
Cobre-Oro	48	27,7%
Oro	60	34,7%
Oro-Cobre	8	4,6%
Oro-Cobre-Plata	4	2,3%
Zinc	1	0,6%
Zinc-Plomo	1	0,6%
S/I	3	1,7%
Total	173	100%

3.4. Presencia de muro, derrames y ubicación en grupos

Mediante el programa ArcMap y las imágenes satelitales que vienen incluidas, se complementa el Catastro en cuanto a la ubicación del depósito (cuenca hidrográfica y unidad morfológica), presencia de un muro claro, derrame y si el depósito de relave se encuentra en grupo. Esta información se detalla en el Catastro de Depósitos de Relaves Abandonados (Anexo B).

En relación a la existencia de un muro claro, se asigna un “si” en el caso de presentarlo. De lo contrario, la celda queda vacía. Según lo observado, 54 depósitos de relaves (31%) presentan un muro claro. En Figura 3.1 se muestra un depósito de relaves abandonado, ubicado en Combarbalá, IV Región, con un muro de arenas claramente identificado. Además, se observa que en este depósito de relaves abandonado es posible la generación de una laguna alejada del muro.



Figura 3.1 Depósito de relaves abandonado (ID 18) con presencia de muro claro y formación de laguna (Google Earth).

En relación a la presencia de derrame, se asigna un “si” en caso de observarse. De lo contrario, la celda queda vacía. Según lo observado, 25 depósitos de relaves (14%) evidencian derrame. En la Figura 3.2 se observa un depósito de relaves abandonado, ubicado en Freirina, III Región, que presenta un derrame evidente.

En el caso de la distribución por grupos, se discrimina por cercanía entre ellos y se enumera por conjunto de depósitos. Según lo observado, 111 depósitos se encuentran en grupos (64%). Se distribuyen en 26 grupos, donde el más grande está compuesto por 35 depósitos y corresponde a los ubicados en la localidad de Andacollo. En la Figura 3.3 se observa el grupo número 21, compuesto por los depósitos de la Sociedad Tungsteno Llamuco SpA (ID 7, 65 y 125), ubicados en la comuna de Salamanca, IV Región.



Figura 3.2 Depósito de relaves abandonado (ID 42) con evidencia de derrame (Google Earth).



Figura 3.3 Depósitos de relaves (ID 7, 65 y 125) ubicados en grupo (Google Earth).

3.5. Distribución según volumen, tonelaje y área

Además de la cantidad de depósitos, el volumen y tonelaje representan otro aspecto de la clasificación. Un depósito de alto tonelaje puede o no convertirse un problema de mayor envergadura que varios depósitos pequeños. En los datos del Catastro figura el “Volumen aprobado” de cada depósito, y se dispone también el “Volumen Actual” para los depósitos activos.

Los 101 depósitos activos, acumularan unos 14.470 millones de metros cúbicos de los 16.000 millones de metros cúbicos del total nacional (90,6%). Los depósitos inactivos llegan al 9,3% de la masa de relaves y los depósitos abandonados representan sólo el 0,1% de la masa. La relevancia de estos últimos se encuentra en su estado de abandono por parte de sus titulares y la ausencia de información (SERNAGEOMIN, 2018a).

En la Figura 3.4 se muestra el desglose por volumen aprobado. Existen cinco depósitos sin información sobre el volumen aprobado, pero cuentan con la información de su volumen actual, listados en la Tabla 3.4. Además de éstos, sólo un depósito cuenta con información de su tonelaje real.

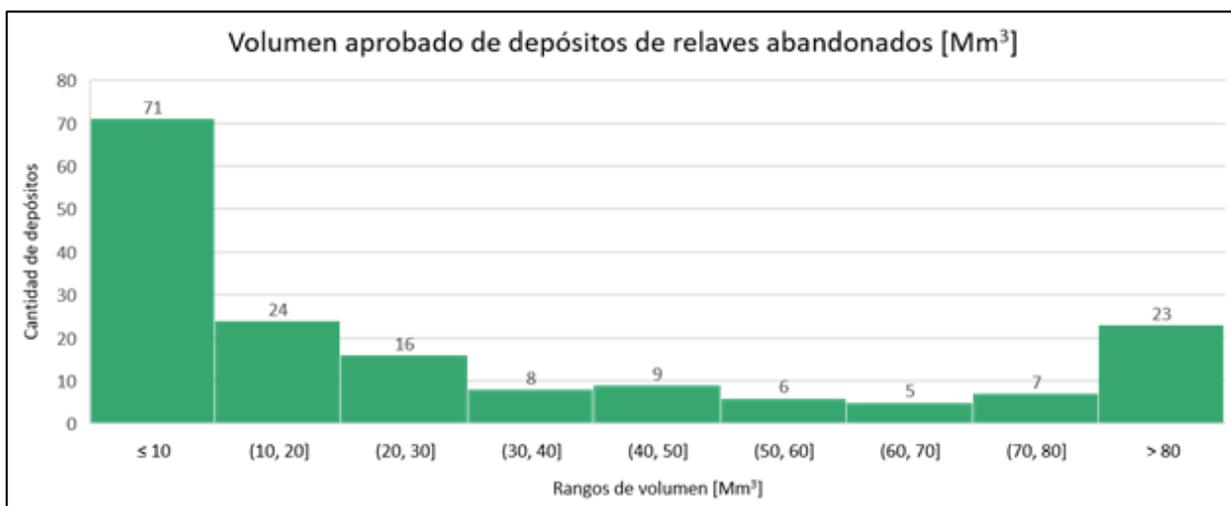


Figura 3.4 Distribución por volumen aprobado de depósitos abandonados (SERNAGEOMIN, 2019a).

Tabla 3.4 Volumen actual de depósitos de relaves abandonados (SERNAGEOMIN, 2019a).

ID Depósito	Volumen actual [m³]
92	1.864
170	3.730
169	7.080
168	11.542
167	28.640
166	199.750

Debido a la falta de información actual de los depósitos abandonados, mediante el programa ArcMap, se calculan las áreas aproximadas, que sirven para tener un primer acercamiento al estado de los depósitos. Estas se presenta en la Figura 3.5.

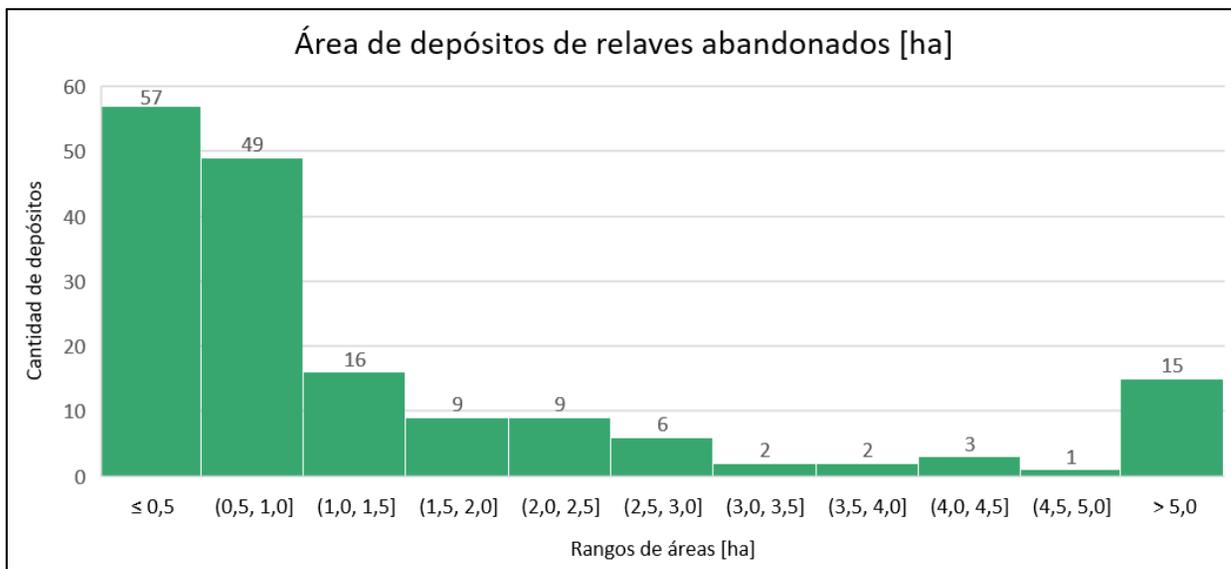


Figura 3.5 Distribución por área de depósitos abandonados (Elaboración propia).

Los depósitos con áreas superiores a 5 hectáreas se muestran en orden ascendente en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Depósitos de relaves abandonados en Chile con áreas superiores a 5 hectáreas (Elaboración propia)

ID	Área [ha]	ID	Área [ha]	ID	Área [ha]
1	5,04	154	6,14	64	7,16
6	5,09	2	6,64	42	7,92
10	5,60	23	6,76	4	8,79
8	5,95	19	6,97	18	9,99
7	5,97	12	7,07	158	13,39

En la Figura 3.6 se muestra la correlación entre el área y el volumen aprobado y, si está disponible, el actual. Además, en la Figura 3.7 se muestra ésta misma correlación en escala logarítmica, filtrando hasta las 5 hectáreas, donde se encuentra casi el 90% de los depósitos de relaves abandonados.

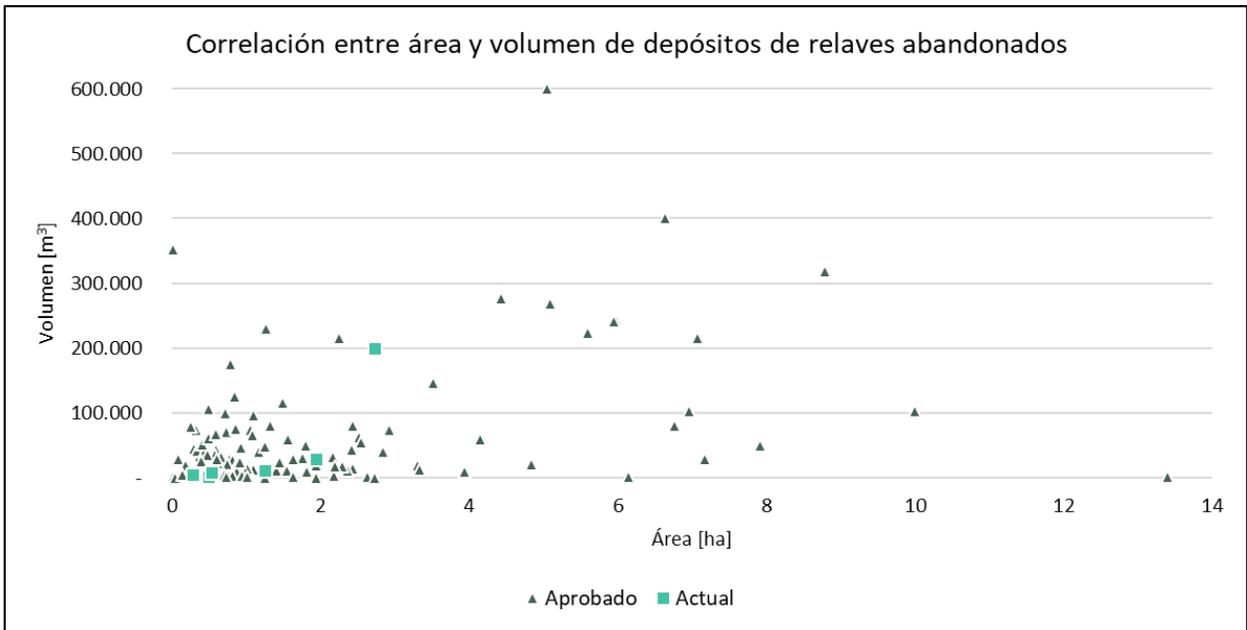


Figura 3.6 Correlación entre área y volumen (Elaboración propia).

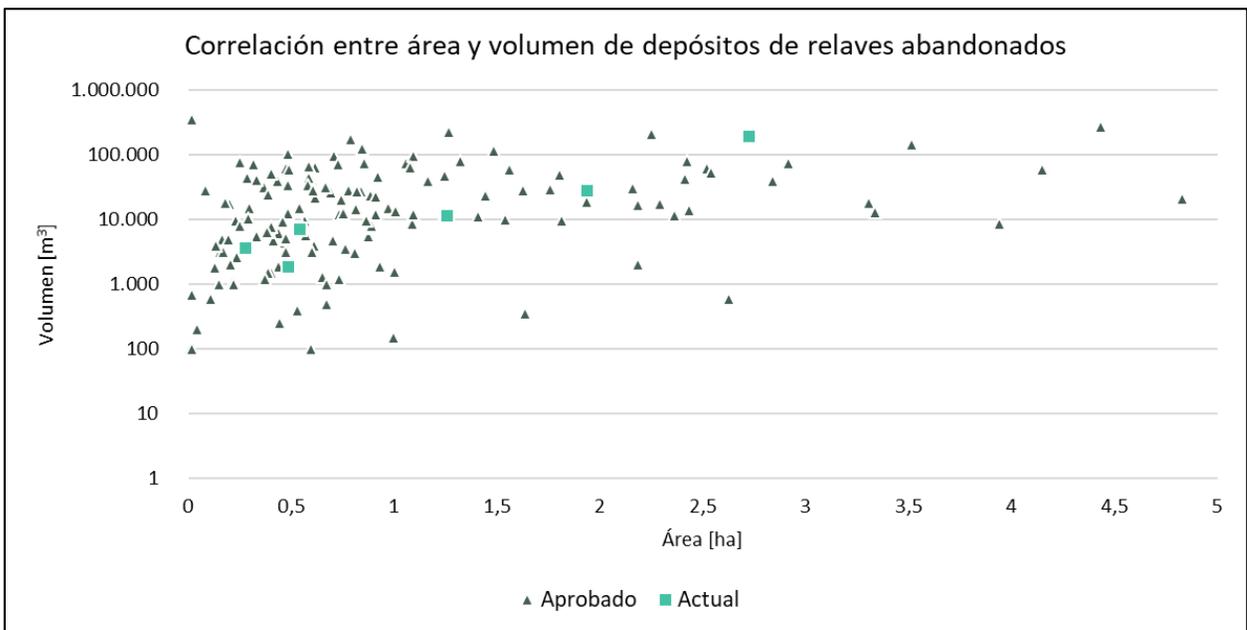


Figura 3.7 Correlación entre área y volumen en escala logarítmica

3.6. Distribución según alturas inferidas

La altura de los depósitos de relaves también constituye un factor importante en la estabilidad física. Mediante el cociente entre el volumen, ya sea aprobado o actual, y el área calculada en la sección 3.5, se obtiene una altura inferida del depósito.

En la Figura 3.8 se muestra distribución de los depósitos de relaves abandonados en Chile según alturas inferidas.

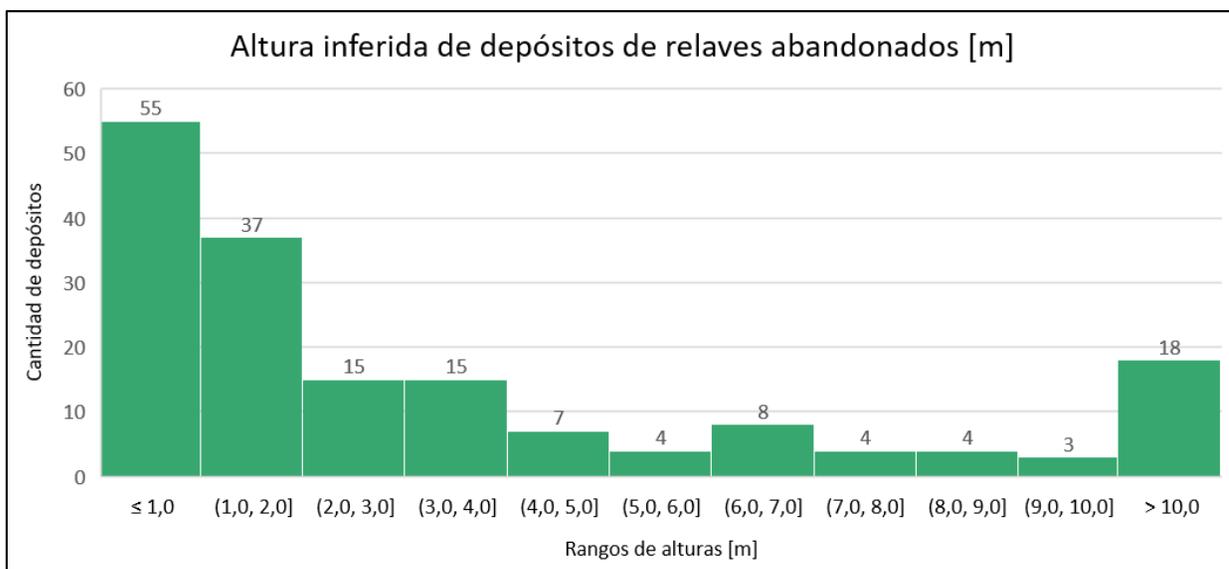


Figura 3.8 Distribución de depósitos de relaves abandonados en Chile según altura inferida (Elaboración propia).

3.7. Distribución según distancias a puntos y áreas de interés

Para entender la importancia relativa de los depósitos de relaves abandonados, es necesario ubicarlos en su contexto geográfico. A continuación, se detallan las distancias entre diversos puntos de interés y los depósitos de relaves abandonados en Chile.

Con el programa ArcMap, tal como se explica en la sección 2.11.1.3, se cargan las capas mostradas en la Tabla 3.6 y se calculan las distancias mediante la herramienta “Crear tabla de cercanía” entre estas capas y la ubicación de los depósitos de relaves abandonados.

Las distribuciones de las distancias calculadas se exponen en las secciones 3.7.1, 3.7.2, 3.7.3 y 3.7.4 más adelante.

Tabla 3.6 Nombre y descripción de capas (Albers, 2012; IDE, 2019).

Nombre	Descripción	Fuente
Áreas urbanas	Medida física de la extensión urbana de las ciudades chilena. La cobertura son las capitales regionales, áreas conurbadas y centros urbanos aledaños.	[1] [2]
Campamentos	Ubicación de campamentos.	[1]
Postas de salud rural	Ubicación de establecimientos de salud, del tipo Postas de Salud Rural. La localización de los establecimientos rurales ha sido mejorada con base en información del Precenso 2016, proporcionada por el Instituto Nacional de Estadísticas.	[1]
Agua potable rural (APR)	Ubicación de los sistemas de agua potable rural, servicios que se prestan en áreas territoriales calificadas como rurales o agrícolas.	[1]

Tabla 3.6 Nombre y descripción de capas (continuación) (Albers, 2012; IDE, 2019).

Nombre	Descripción	Fuente
Centros de Salud del Programa de Reparación y Atención Integral de Salud (PRAIS)	Ubicación de establecimientos de salud. Se incluyen los centros de atención para personas beneficiarias del Programa de Reparación y Atención Integral de Salud (PRAIS) a los afectados por violaciones a los Derechos Humanos.	[1]
Canales	Ubicación de canales de riego	[1]
Ríos y Esteros	Ubicación de ríos y esteros en el territorio nacional.	[2]
Lagos	Capa de información vectorial de los lagos presentes en el territorio nacional. Presenta información de nombre, tipo, uso y área.	[1]
Zonas de interés turístico	Ubicación de las Zonas de Interés Turístico (ZOIT), correspondientes a territorios que tengan condiciones especiales para la atracción turística y que requieran medidas de conservación y una planificación integrada para promover las inversiones del sector privado.	[1]
Circuitos turísticos	Las ocho Rutas Chile, desde el extremo norte al extremo austral del país, son recorridos turísticos que muestran el patrimonio natural y cultural más importante del territorio nacional.	[1]
Santuarios de la naturaleza	Ubicación de todos aquellos sitios terrestres o marinos que ofrezcan posibilidades especiales para estudios e investigaciones geológicas, paleontológicas, zoológicas, botánicas o de ecología, o que posean formaciones naturales, cuya conservación sea de interés para la ciencia o para el Estado. Información a nivel nacional a Agosto del 2016.	[1]
Sitios prioritarios de conservación de la biodiversidad	Ubicación de áreas con oportunidad de emprender acciones de protección.	[1]
Reservas nacionales	Capa de información de las Reservas Nacionales de Chile según decreto correspondiente hasta el año 2009.	[1]
Parques nacionales	Capa de información de los Parques Nacionales presentes en el territorio Nacional según decreto correspondiente hasta el año 2010.	[1]
Reservas marinas	Capa de información de las Reservas Marinas de Chile según decreto correspondiente hasta el año 2005.	[1]
Volcanes activos	Capas de información de los volcanes activos de Chile.	[2]

Referencias: [1] IDE, 2019. [2] Albers, 2012.

3.7.1. Distancias a centros poblados

En esta sección se utiliza la información sobre las Áreas urbanas, Campamentos, Postas de salud rural, APR y PRAIS, descritas en la Tabla 3.6.

El uso de las últimas tres capas se debe a la ausencia de localización de las áreas rurales del país, por lo que la ubicación de éstas se infiere por la ubicación de centros de salud, postas y agua potable de zonas rurales.

En la Figura 3.9 se presenta la distribución según distancia a las capas mencionadas anteriormente.

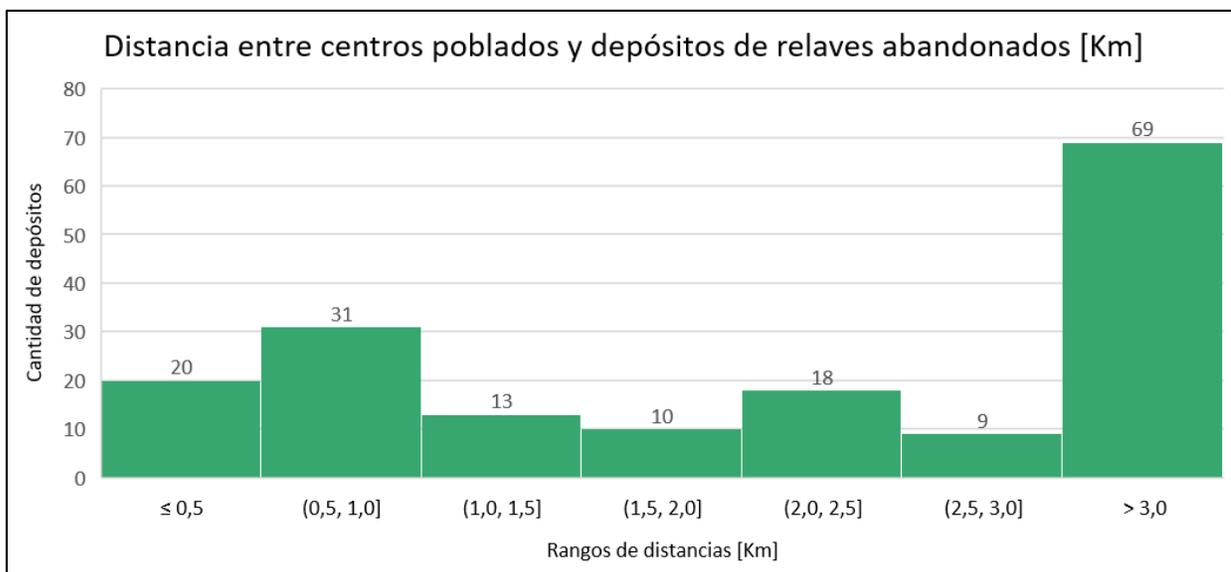


Figura 3.9 Distribución de depósitos de relaves abandonados en Chile según distancia a centros poblados (Elaboración propia).

3.7.2. Distancias a cuerpos de agua

En la Figura 3.10 se presenta la distribución según distancia a las capas de Canales, Ríos, Esteros y Lagos, descritas en la Tabla 3.6.

3.7.3. Distancias a zonas de interés

Las capas analizadas en esta sección son: Circuitos turísticos, Santuarios de la naturaleza, Atractivos turísticos, Zonas de interés turístico, Sitios prioritarios de conservación de la biodiversidad, Reservas nacionales, Reservas marinas y Parques nacionales. Se encuentran descritas en la Tabla 3.6.

En la Figura 3.11 se presenta la distribución según distancia a las capas mencionadas anteriormente.

3.7.4. Distancias a volcanes activos

En la Figura 3.12 se muestra la distribución según distancia entre los depósitos de relaves abandonados y los volcanes activos. Los tres depósitos más cercanos a un volcán activo se encuentran a cerca de 41,5 kilómetros.

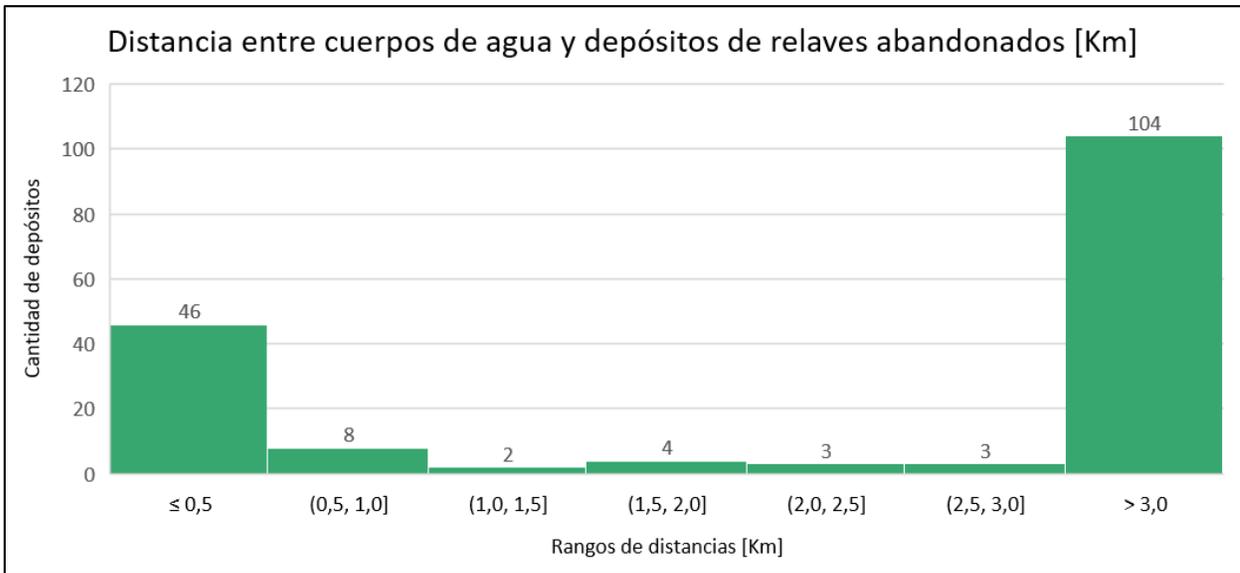


Figura 3.10 Distribución de depósitos de relaves abandonados en Chile según distancia a cuerpos de agua (Elaboración propia).

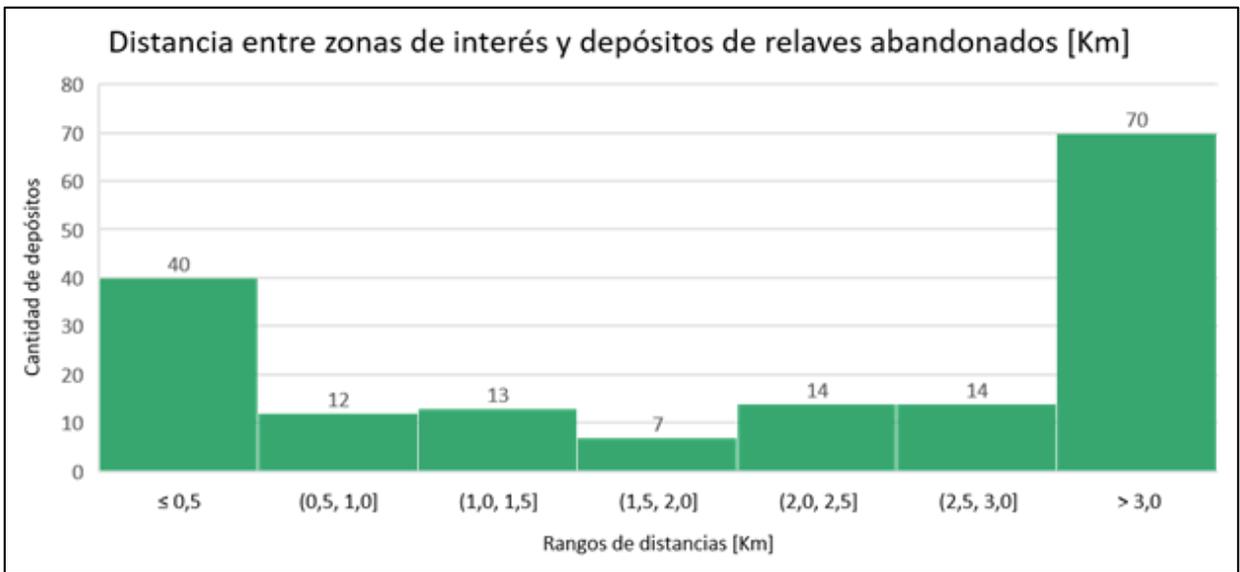


Figura 3.11 Distribución de depósitos de relaves abandonados en Chile según distancia a zonas de interés (Elaboración propia).

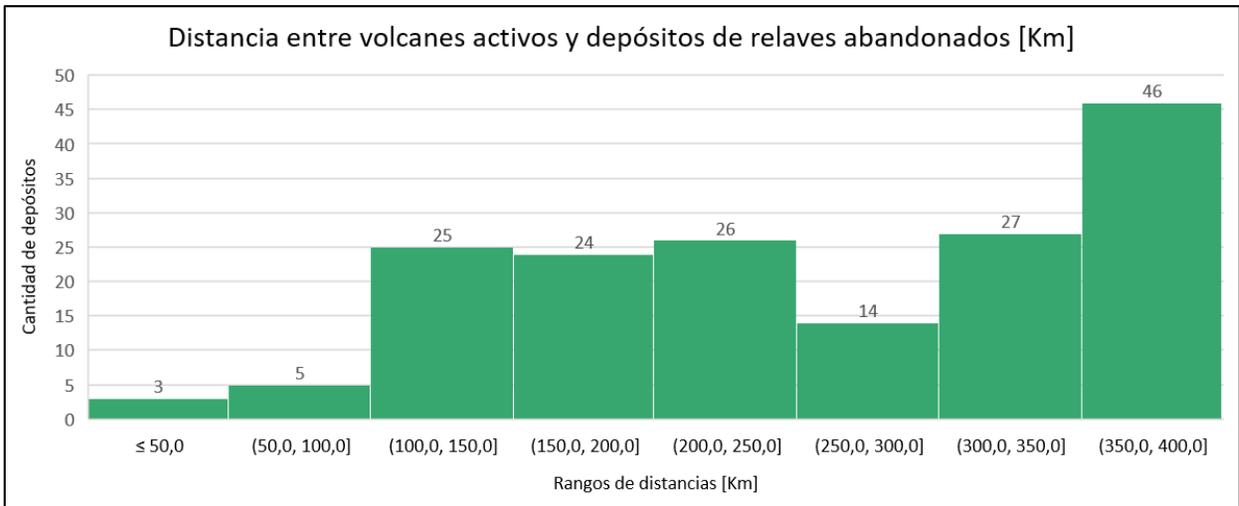


Figura 3.12 Distribución de depósitos de relaves abandonados en Chile según distancia a volcanes activos (Elaboración propia).

3.8. Análisis del Catastro de Depósitos de Relaves Abandonados

El nuevo Catastro de Depósitos de Relaves Abandonados (Anexo B) constituye el primer inventario detallado de depósitos de relaves en este estado.

Además de la información provista por el SERNAGEOMIN, se incorporan los datos obtenidos fruto del trabajo con el programa ArcMap. La presencia del muro claro y la evidencia de derrame constituyen información importante para conocer el estado del depósito de relaves. La ubicación del depósito en relación a otros (grupos) puede ser útil para discriminar la aplicación de la Propuesta Metodológica descrita en este trabajo (Capítulo 4 más adelante) u otro tipo de medidas, como remediación o estudios futuros. El área obtenida por medio de ArcMap es un parámetro útil para dimensionar el problema que representan este tipo de depósitos de relaves.

Sobre el nuevo Catastro de Depósitos de Relaves Abandonados (Anexo B), se destaca que:

- Se observa que se los depósitos de relaves abandonados se encuentran concentrados en la IV Región. Además, en esta región existe una gran cantidad de pequeños productores mineros que, a través de pequeñas plantas de procesamiento de minerales, generan relave también en pequeñas cantidades.
- Existe un predominio de relaves convencionales almacenados en tranques o embalses de relave, con escasa información respecto a su método constructivo.
- En términos de recurso, domina el cobre, y luego el oro.
- De la nueva información incorporada sobre los depósitos de relaves abandonados, se destaca que un 31% presenta muro claro, 14% tiene evidencias de derrame y 64% se ubican en grupo. Además, el 61% tiene áreas menores a 1 hectárea.
- Existe poca información sobre el tonelaje o volumen real, sólo 5 de 173 depósitos de relaves abandonados cuentan con esta información.
- De la relación volumen/área, llamada altura inferida, se observa que casi un 75% de los depósitos de relaves abandonados tienen alturas menores a 5 metros. Revisando caso a caso, se observa que los extremos se pueden ver distorsionados

por el elevado valor de volumen aprobado contrastado con un área muy pequeña, lo que entrega una altura inferida extremadamente alta (caso ID 3, que posee un volumen aprobado de 325.666 m³ y un área de 180 m², entrega una altura inferida de casi 2 kilómetros). En el otro extremo, donde el volumen aprobado es muy pequeño y el área muy elevada, se obtienen alturas cercanas a cero (Caso ID 158, cuyo volumen aprobado es de 300 m³ y un área de más de 13 hectáreas, se obtiene una altura inferida de 2 milímetros).

- En cuanto a las distancias a puntos y áreas de interés, casi un 30% de los depósitos de relaves se ubican a menos de 1 km de población, valor considerado como “fácil acceso a pie”. Un 31% de los depósitos de relaves se ubican a menos de 1 km de agua mientras que un 30% se ubican a menos de 1 km de zonas de interés turístico.
- En cuanto a la ubicación con respecto a los volcanes activos del territorio nacional, a excepción de 3 depósitos de relaves que se ubican a 41 kilómetros de un volcán activo, el resto se ubica a más de 80 kilómetros de volcanes activos.

La necesidad de obtener el área del depósito de relaves y crear una correlación para obtener su altura inferida es el resultado de la poca información disponible en lo relativo a los depósitos de relaves abandonados. Muy pocos cuentan con información sobre su método constructivo o la resolución de calificación ambiental, lo que evidencia la necesidad de investigación y esclarecimiento de las verdaderas condiciones de los depósitos de relaves abandonados en Chile. La principal dificultad para obtener esta información es la desaparición de los titulares de cada faena, mina o depósito de relaves y la ausencia de normativa en el siglo XX que regulase la construcción, operación y cierre de este tipo de infraestructuras.

4. Propuesta metodológica de instrumentación y monitoreo para un depósito de relaves abandonado en Chile

De los capítulos anteriores, se observa la importancia socio-ambiental que poseen los depósitos de relaves y los impactos negativos que generan las pérdidas de estabilidad (física en este caso) de estas estructuras.

Los factores (alturas menores a 50 metros, método constructivo aguas arriba, poco control en la construcción y calidad del muro, entre otras) y causas (sismos y lluvias extremas, entre otras) en común de los incidentes sitúan a los depósitos de relaves abandonados en Chile como potenciales víctimas de pérdidas de estabilidad. Se debe recordar que los mecanismos de falla tienen condiciones que se pueden asociar al emplazamiento, diseño y operación y control, y debido a la ausencia de información relacionadas con éstos, la propuesta debe intentar aclarar estas condiciones.

Acorde a la autora, los factores, condiciones y parámetros relevantes a investigar son:

- Emplazamiento
 - o Características de la cuenca de emplazamiento
 - o Condiciones medioambientales, como lluvias extremas, crecidas, sismos, entre otros
- Diseño
 - o Método constructivo
 - o Geometría del muro, como altura, ángulo del talud aguas abajo, ancho del coronamiento, altura de revancha, entre otras
- Operación y control
 - o Características del material del muro (arenas de relave en tranques o empréstito en embalses), como la compactación y granulometría, entre otras
 - o Estado de saturación del muro
 - o Características del material embalsado, como su granulometría, volumen, nivel freático, resistencia al corte, entre otras
 - o Evidencias de humedad y deformación tanto en el muro, cubeta y suelo de fundación

En relación a los sistemas de instrumentación, se busca la utilización de métodos remotos, no invasivos y con poca inversión de capital (humano y recursos).

En el Capítulo 3 se entrega un primer acercamiento al estado actual de los depósitos de relaves abandonados en Chile, del cual se destaca lo siguiente:

- Dimensiones (área y altura) pequeñas
- 61% se ubica en grupos
- Poca información del método constructivo y tonelaje y volumen real
- 30% se ubica cerca de un asentamiento humano, 31% se ubica cerca de un cuerpo de agua y otro 30% se ubica cerca de una zona de interés turístico.

Por lo tanto, en función de los datos e información revisados y con el objetivo de generar una propuesta de instrumentación y monitoreo, se debe esclarecer el estado actual de los depósitos de relaves abandonados. Esto se realiza mediante la metodología propuesta en este capítulo. Por su parte, las herramientas propuestas para su aplicación

se detallan en el Capítulo 5. Esta separación tiene por objetivo separar el concepto de la metodología con las herramientas utilizadas, debido al rápido avance tecnológico.

Considerando lo recién expuesto, se sugiere la siguiente Propuesta Metodológica (de ahora en adelante “Metodología”), esquematizada conceptualmente en la Figura 4.1 a continuación. A grandes rasgos, la Metodología consta de 5 etapas, 3 categorizaciones, 3 tipos de monitoreo y una revisión del depósito frente a eventos naturales extremos.

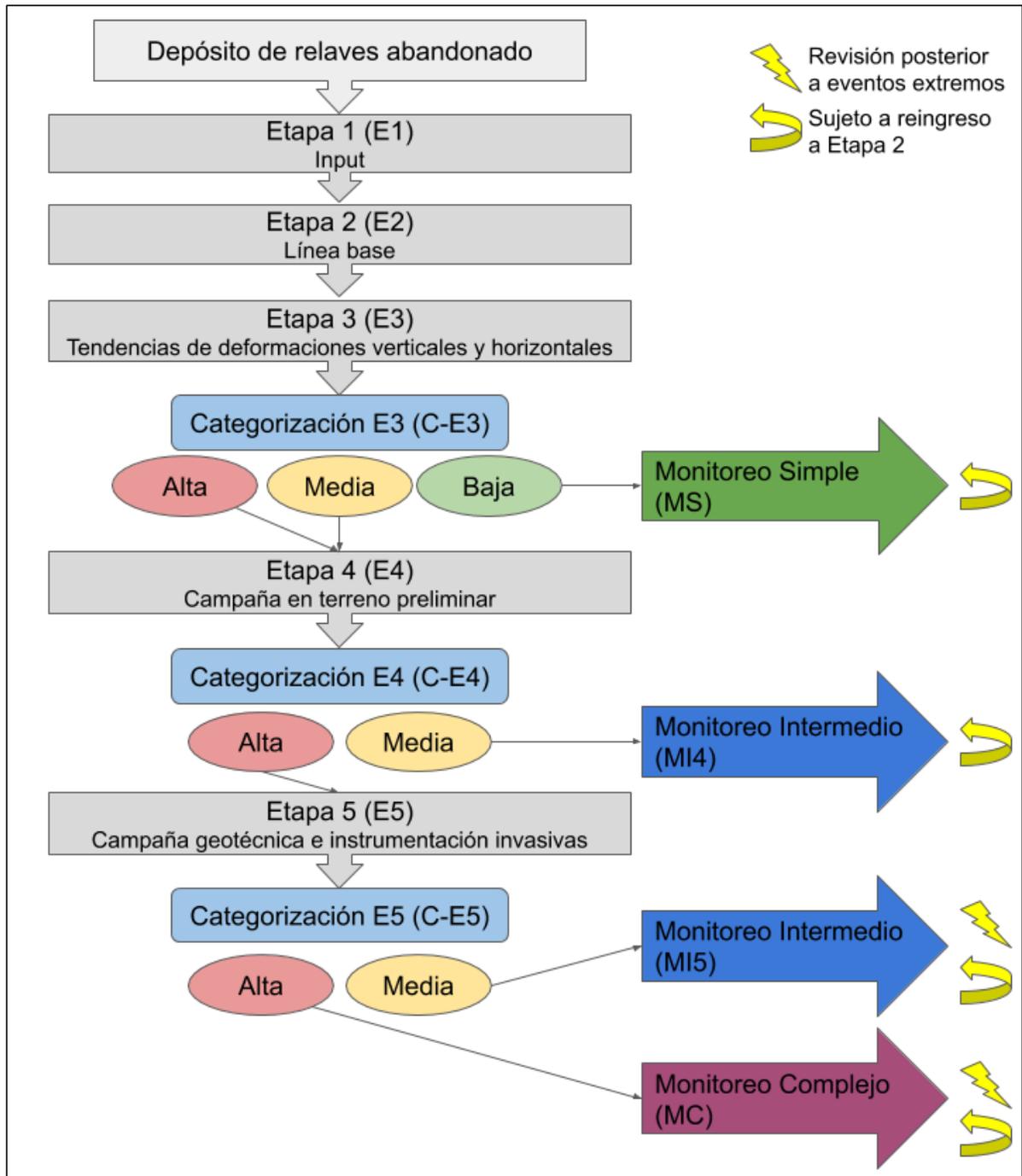


Figura 4.1 Esquema conceptual de Propuesta Metodológica instrumentación y monitoreo para evaluar la estabilidad física de un depósito de relaves abandonado en Chile.

A medida que se avanza en la Metodología, se incorpora mayor información y la disponible se mejora con el objetivo de poder tomar decisiones más informadas, por lo que cada etapa es más compleja que la anterior, en términos de recursos y tecnologías.

La primera etapa (E1) constituye una categorización inicial del depósito según información que se puede obtener de manera remota. La segunda etapa (E2) consiste en establecer una línea base geométrica del depósito en el presente, mientras que en la tercera etapa (E3) se obtienen las tendencias de deformaciones verticales y horizontales históricas. Luego de estas tres etapas, se procede a realizar la segunda categorización (C-E3), donde se le asigna una nueva categoría (“Alta”, “Media” y “Baja”) al depósito. En el caso de obtener una categoría “Baja”, el depósito abandona la Metodología y se le asigna un Monitoreo Simple (MS). En el caso contrario, el depósito continúa en el análisis.

Hasta la Etapa 3, la evaluación se realiza de manera remota, pero a partir de la Etapa 4 (E4), el trabajo requiere trabajo en terreno. En esta etapa (E4), se lleva a cabo una campaña en terreno preliminar, donde se realizan ensayos geofísicos no invasivos y se instalan monolitos de control topográficos. Una vez realizada esta campaña y se analiza la información, se realiza la segunda categorización (C-E4) donde nuevamente se le asigna una categoría al depósito, la cual puede ser “Media” o “Alta”. En el caso de obtener la primera (“Media”), el depósito abandona la metodología y se le asigna un Monitoreo Intermedio (MI4). De lo contrario, el análisis del depósito continúa a la Etapa 5 (E5), que consta de una campaña geotécnica invasiva y la instalación de instrumentos de monitoreo. Luego de esta etapa, se realiza la última categorización de la propuesta, que entrega nuevamente una categoría al depósito, la cual puede ser “Media” o “Alta”. Si se obtiene la categoría “Media”, al depósito se le asigna un Monitoreo Intermedio (MI5). De lo contrario, el depósito tendrá un Monitoreo Complejo (MC).

En el caso de obtener resultados desfavorables en los monitoreos (MS, MI4, MI5 y MC), se sugiere la reincorporación del depósito a la Etapa 2.

Como se menciona anteriormente, los eventos naturales extremos, como sismos y precipitaciones intensas, representan las mayores amenazas a la estabilidad física de los depósitos de relaves abandonados, por lo que se propone una Revisión del depósito en el caso de registrarse o preverse un evento de esta magnitud.

La descripción de cada una de estas etapas, categorizaciones y propuestas de monitoreo se encuentra a continuación.

4.1. Etapa 1: Input (E1)

Objetivo de E1: *Obtener una categoría inicial del depósito mediante información disponible previamente.*

La Etapa 1, abreviada como E1 y llamada “Input”, propone obtener una categoría inicial global del depósito evaluando aspectos generales y de su entorno. Esto se realiza mediante la observación de imágenes satelitales (sección 2.8.1.1) e información disponible en diversas plataformas, como el Catastro complementado con información del Capítulo 3 contenido en el Anexo B y cartas geológicas. La descripción en detalle de las herramientas utilizadas en la Etapa 1 se encuentra en la sección 5.1 más adelante.

Para cumplir este objetivo, se debe caracterizar el depósito en 9 aspectos y entregar categorías parciales (“Alta”, “Media” y “Baja”) para cada uno de estos. A las categorías parciales se les asigna un puntaje según la Tabla 4.1, siendo la categoría “Alta” la más desfavorable y riesgosa, y “Baja” la de menor riesgo. Luego, por medio de ponderadores (Tabla 4.12), se obtiene una categoría global final del depósito.

Tabla 4.1 Puntajes para cada categoría

Categoría	Baja	Media	Alta
Puntaje	1	2	3

Es importante destacar que tanto la distribución de puntajes para cada categoría (Tabla 4.1) como la distribución de categorías para cada aspecto (Tabla 4.2 a Tabla 4.11, excluyendo la Tabla 4.6) son solo propuestas, éstos deben validarse en un panel de expertos y evaluados y juzgados por quienes implementen la Metodología.

Los nueve aspectos a evaluar en esta etapa se describen a continuación.

- **Tipo de tranque:** En la sección 2.10.1 se muestran las siete tipologías de depósitos de relaves no operativos ubicados entre la III y IV Región de Chile que propone Monsalve (2019). En la Tabla 4.2 se presenta la propuesta de categoría según esta clasificación.
- **Edad del depósito:** Como se expone en la sección 2.10.2, en su trabajo de 1990, Troncoso sostiene que el envejecimiento de las arenas tiene un efecto favorable en las propiedades mecánicas y dinámicas de las estructuras de suelos. Por esto, se propone una asignación de categorías por edad del depósito como se muestra en la Tabla 4.3. En el caso de no tener información sobre la edad del depósito, se sugiere un enfoque conservador, optando por asignar una categoría “Alta” a este aspecto.
- **Método constructivo:** Como se muestra en el Capítulo 2, el método constructivo está directamente relacionado con la estabilidad física del depósito. En la Tabla 4.4 se propone una categorización según método constructivo.
- **Cercanía a puntos de interés:** Con las distancias obtenidas en la sección 3.7, se propone la distribución de categorías según la Tabla 4.5. Para asignar la categoría global del aspecto “Cercanía a puntos de interés”, se utiliza el criterio propuesto en la Tabla 4.6.
- **Altura inferida:** cómo existe información acotada del volumen embalsado real, se propone utilizar la relación del volumen y área (sección 3.6) del depósito para obtener una altura inferida promedio del depósito, y ocupar la distribución de categorías mostrada en la Tabla 4.7.
- **Fallas geológicas:** Con el objetivo de considerar los sismos corticales y según los criterios expuestos en la sección 2.10.3, se propone la distribución de categorías según distancias a fallas geológicas mostrada en la Tabla 4.8.
- **Actividad sísmica:** para sismos interplaca e intraplaca de profundidad intermedia, se plantea considerar la ubicación del depósito de acuerdo a las zonas sísmicas descritas en la sección 2.10.4. Según esto, se propone la distribución de categorías como se muestra en la Tabla 4.9.

- **Exposición a crecidas y escorrentías:** según la información expuesta en la sección 2.10.5 se propone la distribución de categorías mostrada en la Tabla 4.10, la que determina la exposición del depósito a la crecida de un curso de agua.
- **Volcanismo:** considerando lo expuesto en la sección 2.10.6, se propone la distribución de categorías mostradas en la Tabla 4.11.

Tabla 4.2 Propuesta de categorías según Tipo de tranque.

Categoría	Baja	Media	Alta
Puntaje	1	2	3
Tipo de Tranque	Tipo 2	Tipo 3, Tipo 5	Tipo 1, Tipo 4, Tipo 6, Tipo 7

Tabla 4.3 Propuesta de categorías según Edad del depósito

Categoría	Baja	Media	Alta
Puntaje	1	2	3
Edad del depósito	Mayor a 30 años	Entre 30 y 5 años	Menor a 5 años

Tabla 4.4 Propuesta de categorías según Método Constructivo

Categoría	Baja	Media	Alta
Puntaje	1	2	3
Método Constructivo	Aguas abajo	Eje central	Aguas arriba Indeterminado No corresponde a las tipologías con muro de arenas

Tabla 4.5 Propuesta de categorías según Cercanía a puntos de interés

Categoría	Baja	Media	Alta
Puntaje	1	2	3
(1) Distancia a áreas urbanas y rurales	Mayor a 2 Km	Entre 1 y 2 Km	Menor a 1 Km
(2) Distancia a cuerpos de aguas (ríos, esteros)	Mayor a 1 Km	Entre 0,5 y 1 Km	Menor a 0,5 Km
(3) Distancia a Zonas de interés	Mayor a 2 Km	Entre 1 y 2 Km	Menor a 1 Km

Tabla 4.6 Categoría general para Cercanía a puntos de interés

Caso	Categoría parcial Distancia a áreas urbanas y rurales	Categoría parcial Distancia a cuerpos de agua	Categoría parcial Distancia a Zonas de Interés	Categoría global depósito Cercanía a puntos de interés
1	Alta	Cualquiera	Cualquiera	Alta
2	Cualquiera	Alta	Cualquiera	Alta
3	Media	Media	Alta	Alta
4	Baja	Media	Alta	Alta
5	Media	Baja	Alta	Alta
6	Baja	Media	Media	Media
7	Media	Baja	Media	Media
8	Baja	Media	Baja	Media
9	Media	Baja	Baja	Media
10	Media	Media	Media	Media
11	Media	Media	Baja	Media
12	Baja	Baja	Alta	Media
13	Baja	Baja	Media	Baja
14	Baja	Baja	Baja	Baja

Tabla 4.7 Propuesta de distribución de categorías según Altura inferida

Categoría	Baja	Media	Alta
Puntaje	1	2	3
Altura inferida	Menor a 5 m	Entre 5 y 15 m	Mayor a 15 m

Tabla 4.8 Propuesta de distribución de categorías según distancia a Fallas geológicas

Categoría	Baja	Media	Alta
Puntaje	1	2	3
Distancia a falla geológica	Mayor a 200 m	Entre 100 y 200 m	Menor a 100 m Atraviesa el depósito

Tabla 4.9 Propuesta de distribución de categorías según Actividad Sísmica

Categoría	Baja	Media	Alta
Puntaje	1	2	3
NCh 433	-	Zona 1, Zona 2	Zona 3

Tabla 4.10 Propuesta de distribución de categorías según Exposición a crecidas y escorrentías

Categoría	Baja	Media	Alta
Puntaje	1	2	3
Exposición a crecidas y escorrentías	No se encuentra expuesto	-	Depósito ubicado en una quebrada A menos de 100 m de un cuerpo de agua

Tabla 4.11 Propuesta de distribución de categorías según Actividad volcánica

Categoría	Baja	Media	Alta
Puntaje	1	2	3
Volcanismo	Depósito ubicado fuera de las zonas de peligro de volcánico (SERNAGEOMIN) y a una distancia mayor a 50 Km del volcán	Depósito ubicado fuera de las zonas de peligro volcánico (SERNAGEOMIN) y a una distancia entre 10 y 50 Km	Depósito ubicado dentro de las zonas de peligro volcánico (SERNAGEOMIN) y a una distancia menor a 10 Km

Una vez obtenidas las categorías para cada uno de estos 9 criterios (Tabla 4.2 a Tabla 4.11, excluyendo la Tabla 4.6), se realiza una suma ponderada de los puntajes asignados por categoría (Tabla 4.1) con los ponderadores de la Tabla 4.12, expuesta a continuación.

El valor obtenido será un número entre 1 y 3 y se propone que los valores ubicados entre 1 y 1,5 se les asigna una categoría “Baja”; entre 1,5 y 2,5, “Media”; entre 2,5 y 3, “Alta”, esquematizado en la Figura 4.2.

Es importante recalcar que tanto los ponderadores como la distribución de categorías son solo sugerencias para este trabajo, los que deberán ser validados por un panel de expertos y evaluados y juzgados por quienes implementen la Metodología.

Con esta categoría inicial, se pueden tomar decisiones de inversión de recursos económicos y humanos, determinar calidad de información que se requerirá en las etapas posteriores y tener clara la importancia relativa de este depósito.

Tabla 4.12 Ponderadores para criterios de Etapa 1.

Criterio	Ponderador
(1) Tipo de tranque	0.10
(2) Edad del depósito	0.05
(3) Método constructivo	0.10
(4) Cercanía a puntos de interés	0.25
(5) Altura inferida	0.10
(6) Fallas geológicas	0.10
(7) Sismicidad	0.15
(8) Exposición a crecidas y escorrentías	0.10
(9) Volcanismo	0.05

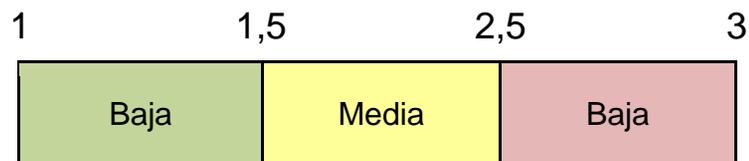


Figura 4.2 Propuesta de distribución de categorías en tramos.

4.2. Etapa 2: Línea de base (E2)

Objetivo: Establecer línea de base geométrica. Crear modelo DEM para obtener geometría relevante del depósito de relaves abandonado y entorno. Establecer historia constructiva y operacional del depósito.

La Etapa 2, abreviada como E2 y llamada “Línea de base”, propone obtener una línea de base geométrica del depósito, enfocándose en la topografía del depósito y su entorno.

Con la creación de un modelo de elevación digital (DEM), descrito en la sección 2.8.1.3, se puede determinar la geometría relevante del depósito y su entorno, prestando especial atención a los aspectos numerados a continuación. De ser posible, se debe complementar información obtenida en la E1.

1. Método constructivo
2. Altura de muro
3. Altura de revancha
4. Inclinación del talud aguas abajo
5. Ancho de coronamiento
6. Topografía del depósito y valle/cuenca

Además de este procedimiento, se intenta construir la historia constructiva del depósito de relaves abandonado revisando diferentes fuentes de información, ya sea imágenes fotográficas de la época o registros de la empresa. Esto tiene por objeto intentar esclarecer la misma información numerada anteriormente, especialmente el método constructivo, historia operacional del depósito y la topografía del valle previo a la construcción del depósito.

Las herramientas utilizadas en la Etapa 2 se detallan en la sección 5.2 más adelante.

Esta línea de base se utiliza para determinar cuáles son los mecanismos de falla relevantes en el depósito de relaves abandonado (sección 4.3.1).

4.3. Etapa 3: Tendencias de deformaciones verticales y horizontales (E3)

Objetivo: *Obtener deformaciones y sus tendencias históricas mediante DInSAR. Determinar mecanismos de falla relevantes para el depósito.*

La Etapa 3, abreviada como E3 y llamada “Tendencias de deformaciones verticales y horizontales”, consiste en, valga la redundancia, la obtención de las tendencias de deformaciones tanto verticales como horizontales mediante interferometría diferencial.

En esta etapa, se busca obtener evidencias de deformaciones tanto verticales (subsidiencias) como horizontales (desplazamientos) en el muro (coronamiento, pie y estribos) y en la cubeta, procurando que evidencien una tendencia deformacional y no una medida puntual. Esto se realiza mediante interferometría diferencial, descrito en la sección 2.8.1.2.

Las herramientas utilizadas en la *Etapa 3* se detallan en la sección 5.3 más adelante.

Las tendencias obtenidas son usadas para determinar los mecanismos de falla relevantes del depósito de relaves abandonado (sección 4.3.1)

4.3.1. Mecanismos de falla relevantes (MFR)

Con la información obtenida en las *Etapas 1, 2 y 3*, se identifican los mecanismos de falla relevantes (MFR) para el depósito de relaves abandonado. Se entiende por “relevante” que en el depósito de relaves abandonado es posible la generación de aquel mecanismo y, acorde a la autora, estos pueden ser: Inestabilidad de taludes (IT), Rebalse (R) y Erosión Interna (EI). En Carvajal (2017) se describen en detalle los árboles de falla de estos tres mecanismos.

En este caso, para definir los MFR, se debe determinar si los parámetros críticos presentados en la Tabla 4.13 se observan o no en el depósito de relaves abandonado, o si sus valores se encuentran bajo o sobre cierto umbral. A modo de ejemplo, al analizar el mecanismo de rebalse, en el depósito de relaves puede o no existir revancha, y en el caso de presentarse, ésta puede ser menor al metro (1) recomendado por el DS 248. También es posible o no la generación de laguna cercana al muro y que la pendiente de la playa favorezca o no la generación de esta laguna. Si existe una altura de revancha mayor a un (1) metro, no es posible la generación de laguna y la inclinación de la playa no es a favor del muro, es virtualmente imposible la generación de rebalse. Por otro lado,

en el caso de presentarse alguno de estos parámetros, se considera que el mecanismo de rebalse puede generarse y se establece como mecanismo de falla relevante para ese depósito de relaves.

En este trabajo, un mecanismo de falla se convierte en relevante (MFR) si es posible su generación o si algún parámetro crítico excede cierto umbral. En ese sentido y al ser una Metodología acumulativa, el proceso de determinación de los mecanismos de falla relevantes debe realizarse luego la adquisición de nueva información, vale decir, luego de cada etapa.

En la Tabla 4.13 se presentan los parámetros críticos de los mecanismos de falla de Inestabilidad de Taludes, Rebalse y Erosión Interna, y se destacan con negrita los que poseen información hasta la Etapa 3.

En este caso, luego de la *Etapa 1, 2 y 3* (secciones 4.1, 4.2 y 4.3 respectivamente), se deben responder las preguntas presentadas en la Tabla 4.14, que se corresponden con la información de los parámetros críticos disponibles hasta este momento de la Metodología (parámetros en negrita en Tabla 4.13).

Este análisis se debe repetir posterior las etapas siguientes (E4 y E5) considerando la nueva información obtenida en cada una, por lo que los parámetros no destacados en la Tabla 4.13 podrán ser analizados a medida que se avance en la Metodología.

Tabla 4.13 Parámetros críticos asociados a mecanismos de falla relevantes en depósitos de relave abandonados (Elaboración propia).

Mecanismos de falla	Parámetros críticos
Inestabilidad de taludes (IT)	Ángulo del talud Deformaciones (asentamientos diferenciales) Deslizamientos en talud Grietas en el coronamiento Nivel freático del muro y depósito Presiones de poros del muro y depósito Granulometría del material del muro y cubeta Características mecánicas del material del muro y cubeta
Rebalse (R)	Altura de revancha Generación de laguna cerca del muro Pendiente de playa
Erosión interna (EI)	Flujo o humedad en muro (talud aguas abajo), estribos o pie de muro Evidencia de erosión retrógrada en talud aguas abajo Subsidiencias al pie del muro o cubeta cerca del muro Granulometría del material del muro Presión de poros al interior del muro y/o en el terreno de fundación

Luego de este análisis, es posible asignar una nueva categoría a los depósitos, como se explica en la *Categorización de la Etapa 3* (sección 4.4 a continuación).

Tabla 4.14 Preguntas para determinar mecanismos de falla relevantes para un depósito de relaves abandonado posterior a Etapa 3 (Elaboración propia).

Mecanismos de falla	Preguntas por parámetro crítico
Inestabilidad de taludes (IT)	¿El ángulo del talud es pronunciado? ¿Hay evidencias de deformaciones en el muro o cubeta cerca del muro? ¿Hay evidencias de deslizamientos en el talud o grietas en el coronamiento?
Rebalse (R)	¿Existe revancha? ¿Es suficiente? ¿Es posible la generación de laguna cerca del muro? ¿La pendiente de la playa favorece la generación de laguna?
Erosión interna (EI)	¿Hay evidencias de zonas húmedas? ¿Hay evidencias de erosión retrógrada? ¿Hay evidencias de subsidencias en el pie del muro o cubeta cerca del muro?

4.4. Categorización de la Etapa 3 (C-E3)

La categorización posterior a la Etapa 3 (C-E3) se describe en el diagrama de la Figura 4.3. A grandes rasgos, dependiendo de la cantidad de MFR, se determina la nueva categoría del depósito de relaves abandonado.

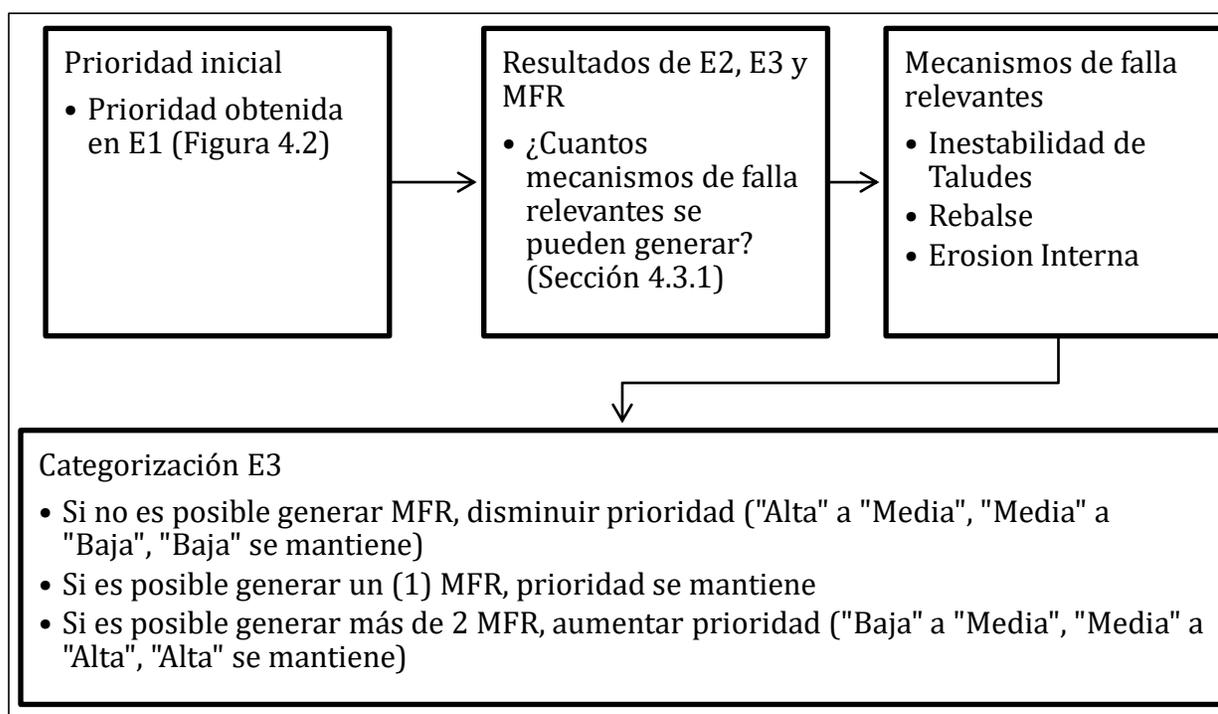


Figura 4.3 Diagrama de Categorización de la Etapa 3 (P-E3)

Como se muestra en el extracto (Figura 4.4) de la Propuesta Metodológica (Figura 4.1), si la categoría es “*Baja*”, el depósito abandona la Metodología y se le asigna un *Monitoreo Simple (MS)*, descrito en la sección 4.5 más adelante. De lo contrario, vale decir si la categoría del depósito es “*Media*” o “*Alta*”, el depósito continúa bajo análisis en la *Etapa 4*, descrita en la sección 4.6 más adelante.

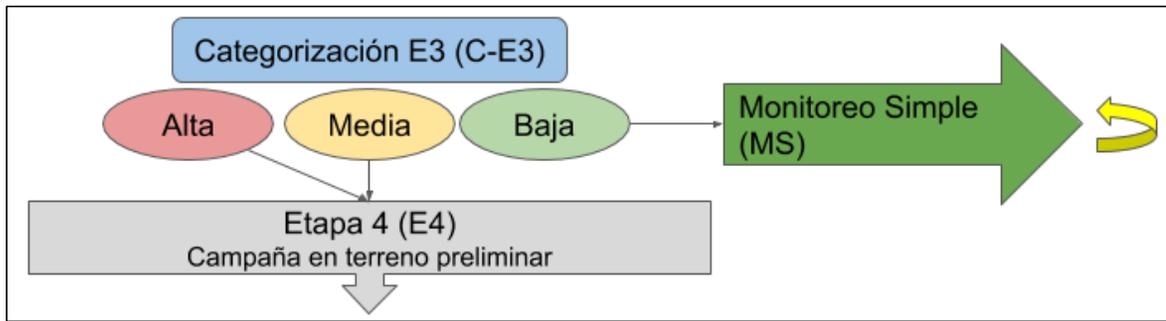


Figura 4.4 Extracto de Esquema de Propuesta Metodológica (C-E3 y E4).

4.5. Monitoreo Simple (MS)

El *Monitoreo Simple (MS)* son las exigencias mínimas en términos de monitoreo en un depósito de relaves abandonado. Éstas se describen a continuación y se resumen en la Figura 4.3.

- Revisión posterior a actualización del Catastro SERNAGEOMIN: cada vez que se incorpore nueva información al Catastro del SERNAGEOMIN o se realicen investigaciones relativas al depósito en estudio, complementar la información en la Etapa 1. Esta nueva información puede cambiar la categoría obtenida en C-E3, alternado su eventual salida a MS.
- Registros fotográficos: realizar registros fotográficos cada 6 meses por 2 años (en primavera/verano y otoño/invierno) mediante imágenes satelitales o fotografía en terreno. Luego de 2 años, cambiar la frecuencia a 1 año en la estación del año más desfavorable según los MFR. El propósito de este requerimiento es mantener una base de datos para eventuales análisis.
- Búsqueda de evidencias de MFR: Buscar aparición de evidencias de los mecanismos de falla (EI, R, EI) en el registro fotográfico. De encontrarse, actualizar información en E2 y E3, ya que se puede alterar la categoría obtenida en C-E3.

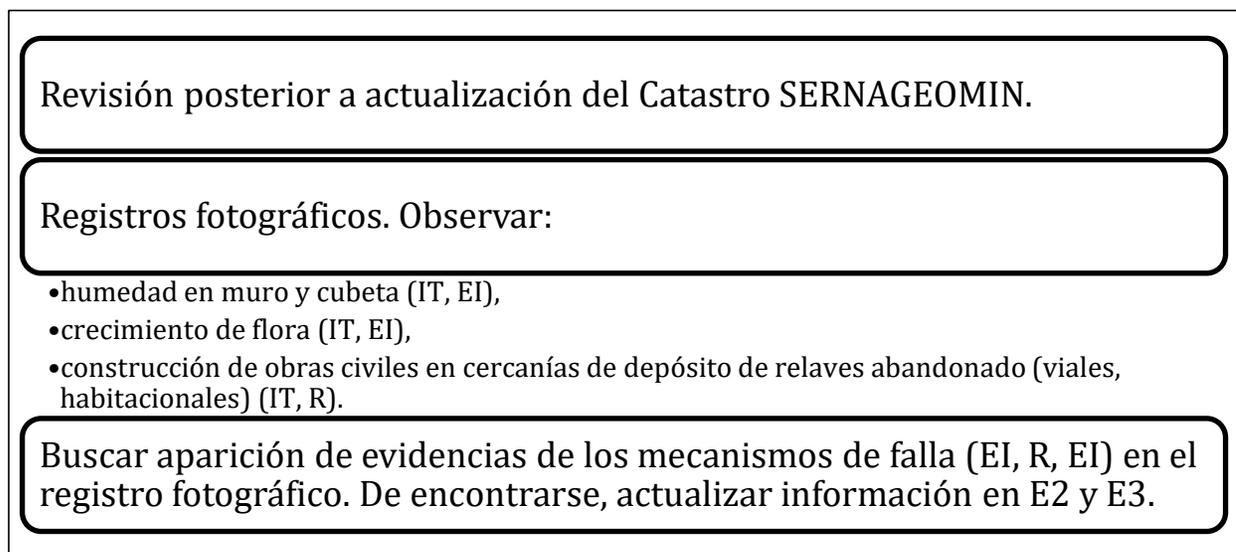


Figura 4.5 Descripción del Monitoreo Simple (MS).

Las *Etapas 1, 2 y 3* (secciones 4.1, 4.2 y 4.3 respectivamente) junto al *Monitoreo Simple (MS)* se realizan de manera remota en gabinete. A partir de la *Etapa 4* (sección 4.6 más adelante), la aplicación de la Metodología se realiza en terreno.

4.6. Etapa 4: Campaña en terreno preliminar (no invasiva e invasiva somera) (E4)

Objetivo: *Determinar la geometría superficial en alta definición, una estimación del perfil estratigráfico de la cubeta y el muro, y una estimación de la ubicación del nivel freático. Establecer línea de base en terreno. Instalación de hitos topográficos para monitoreo remoto.*

La *Etapa 4* constituye la primera visita a terreno de la Metodología y tiene por objetivos conocer la estructura interna del depósito y detallar su geometría superficial. La campaña en terreno debe estar supeditada a los mecanismos de falla relevantes determinados en la sección 4.3.1 más atrás. Esto quiere decir, que será necesaria la realización de los ensayos cuyo mecanismo de falla asociado sea relevante en el depósito de relaves abandonado. A continuación, se detalla la campaña en terreno preliminar:

- Levantamiento topográfico: tiene por objetivo mejorar información disponible de la geometría superficial del depósito. Se deben ocupar herramientas con mayor precisión que en la Etapa 2.
- Técnicas geofísicas superficiales: tienen por objetivo (1) determinar perfil estratigráfico del muro y cubeta, (2) determinar geometría de la cuenca y (3) en el caso de existir, ubicar el nivel freático del muro y cubeta. Los ensayos geofísicos se encuentran detallados en el Anexo D.
- Ensayos no destructivos someros: para obtener correlaciones con mediciones en profundidad. Las mediciones deben realizarse en cubeta (al menos 3 puntos) y en muro (al menos 3 puntos). Pueden realizarse mediante el ensayo DCP o PANDA, que tienen profundidades de investigación de hasta 6 metros. Ambos ensayos se encuentran descritos en el Anexo D.
- Inspección visual e instalación de hitos topográficos: revisión del estado del depósito de relaves (grietas, singularidades, forma, entre otras) e instalación de hitos topográficos para control de deformaciones en el futuro, procesos descritos en el Anexo 0D.

En la Tabla 4.15 se resume el tipo de auscultación, el ensayo sugerido y los resultados esperados. El detalle de las herramientas utilizadas para la realización de estos ensayos e inspecciones se encuentra en la sección 5.4 más adelante.

Es importante destacar que el levantamiento topográfico, la inspección visual y la instalación de hitos topográficos se consideran como obligatorios en esta etapa, ya que se aplican cuando alguno de los tres mecanismos de falla es relevante. Por otro lado, en el caso de no ser relevante algún mecanismo de falla, no se debe realizar la auscultación asociada a éste. Sin embargo, esto puede quedar a criterio del profesional que aplique la Metodología.

Luego de la campaña en terreno, es necesario procesar la información recopilada. Con esto, es posible:

- Caracterizar de manera preliminar la geometría superficial y el contenido a una profundidad somera el relave (cubeta) y muro (aproximadamente 6 metros).
- Realizar un Análisis de Estabilidad física preliminar (Estabilidad de taludes y Estudio de filtraciones) (sección 2.9.3)
- Actualizar los mecanismos de falla relevantes con la nueva información (ver sección 4.6.1 más adelante)
- Identificar zonas de riesgo donde se puedan iniciar los mecanismos de falla

Una vez realizado el procesamiento de la información, se obtiene:

- Geometría del depósito
- Ubicación del nivel freático en caso de existir
- Cálculo de Estabilidad Física preliminar, asociado a un factor de seguridad. Se deben realizar Análisis de estabilidad estática y pseudo-estáticos 2D. En la *Etapa 4* se puede inferir geometría, características mecánicas y nivel freático para este análisis.
- Línea de base en terreno, sumado a las zonas de riesgo y la línea de base en gabinete
- Puntos de referencia en terreno

Con esta información, se pueden actualizar los mecanismos de falla relevantes (sección 4.6.1 más adelante) y luego, la *Categorización de la Etapa 4*, descrita en la sección 4.6.1 más adelante.

Tabla 4.15 Campaña en terreno a realizar en Etapa 4.

Tipo de auscultación	MFR	Ensayo	Resultado	Descripción
Geofísica	IT EI	Nakamura	Periodo predominante T	Anexo D
	IT EI	MASW	Perfil de velocidades de onda de corte Vs Frontera aproximada relave-cuenca	Anexo D
	IT R EI	Resistividad eléctrica	Nivel freático (si existe) Frontera aproximada relave-cuenca	Anexo D
Ensayo no destructivo somero	IT EI	PANDA	Índice de penetración para correlacionar con parámetros resistentes	Anexo D
		DCP		Anexo D
Topografía	IT R EI	Levantamiento topográfico	Modelo 3D de superficie en terreno de depósito	Núñez, 2019
Línea de base en terreno	IT R EI	Inspección visual	Inspección visual que busca identificar y describir aspectos críticos del depósito (dimensiones, indicadores, características del entorno, medición y mantención de instrumentos)	Anexo D
Puntos de referencia	IT R EI	Instalación de hitos topográficos	Monitoreo de zonas críticas (pie de muro, coronamiento, cubeta) Puntos de referencia en terreno y las distancias entre ellos	Anexo C

4.6.1. Actualización de MFR posterior a Etapa 4

Mediante la información recopilada y procesada en la *Etapa 4*, es posible reevaluar los mecanismos de falla relevantes para el depósito de relaves abandonado.

Como se incorpora información relativa a la geometría (ángulo del talud, altura de revancha, pendiente de la playa), se realiza una inspección visual (existencia de grietas, deslizamientos, flujos, humedad) y se incorpora información sobre la estructura interna del depósito, se recomienda la evaluación de los tres mecanismos de falla (IT, R y EI), sean relevantes o no.

En la Tabla 4.16 corresponde a los parámetros críticos de los tres mecanismos de falla y en negrita se destacan los que pueden ser evaluados en la *Etapa 4* con la nueva información incorporada. Por su parte, en la Tabla 4.17 se exponen las preguntas necesarias para determinar si el mecanismo de falla continua en su condición de relevante o no, vale decir, si existen o no las condiciones para que se genere.

Tabla 4.16 Parámetros críticos asociados a mecanismos de falla relevantes en depósitos de relave abandonados (Elaboración propia).

Mecanismos de falla	Parámetros críticos
Inestabilidad de taludes (IT)	Ángulo del talud Deformaciones (asentamientos diferenciales) Deslizamientos en talud Grietas en el coronamiento Nivel freático del muro y depósito Presiones de poros del muro y depósito Granulometría del material del muro y cubeta Características mecánicas del material del muro y cubeta
Rebalse (R)	Altura de revancha Generación de laguna cerca del muro Pendiente de playa
Erosión interna (EI)	Flujo o humedad en muro (talud aguas abajo), estribos o pie de muro Evidencia de erosión retrógrada en talud aguas abajo Subsidiencias al pie del muro o cubeta cerca del muro Granulometría del material del muro Presión de poros al interior del muro y/o en el terreno de fundación

Tabla 4.17 Preguntas para actualizar los mecanismos de falla relevantes en el depósito de relaves abandonado en la Etapa 4 (Elaboración propia).

Mecanismos de falla	Preguntas por parámetro crítico
Inestabilidad de taludes (IT)	¿El ángulo del talud es pronunciado? ¿Hay evidencias de deformaciones en el muro o cubeta cerca del muro? ¿Hay evidencias de deslizamientos en el talud o grietas en el coronamiento? ¿Existe nivel freático? ¿Cuál es su ubicación?
Rebalse (R)	¿Existe revancha? ¿Es suficiente? ¿Es posible la generación de laguna cerca del muro? ¿La pendiente de la playa favorece la generación de laguna?
Erosión interna (EI)	¿Hay evidencias de zonas húmedas? ¿Hay evidencias de erosión retrógrada? ¿Hay evidencias de subsidiencias en el pie del muro o cubeta cerca del muro? De existir estas evidencias, ¿existen sectores con suelos poco competentes? ¿Existe nivel freático capaz de generar erosión interna?

Si alguna de las respuestas a las preguntas de la Tabla 4.17 es si o se excede cierto umbral establecido por el profesional que aplique la Metodología, se considera que el mecanismo de falla es relevante para aquel depósito de relaves abandonado.

4.7. Categorización de la Etapa 4 (C-E4)

Esta categorización tiene por principio la siguiente frase: “Solo castigar o mantener, no mejorar”. Esto ya que la información es inferida u obtenida de correlaciones.

Con esto en consideración, la categorización de la Etapa 4 se realiza de acuerdo al diagrama de la Figura 4.6.

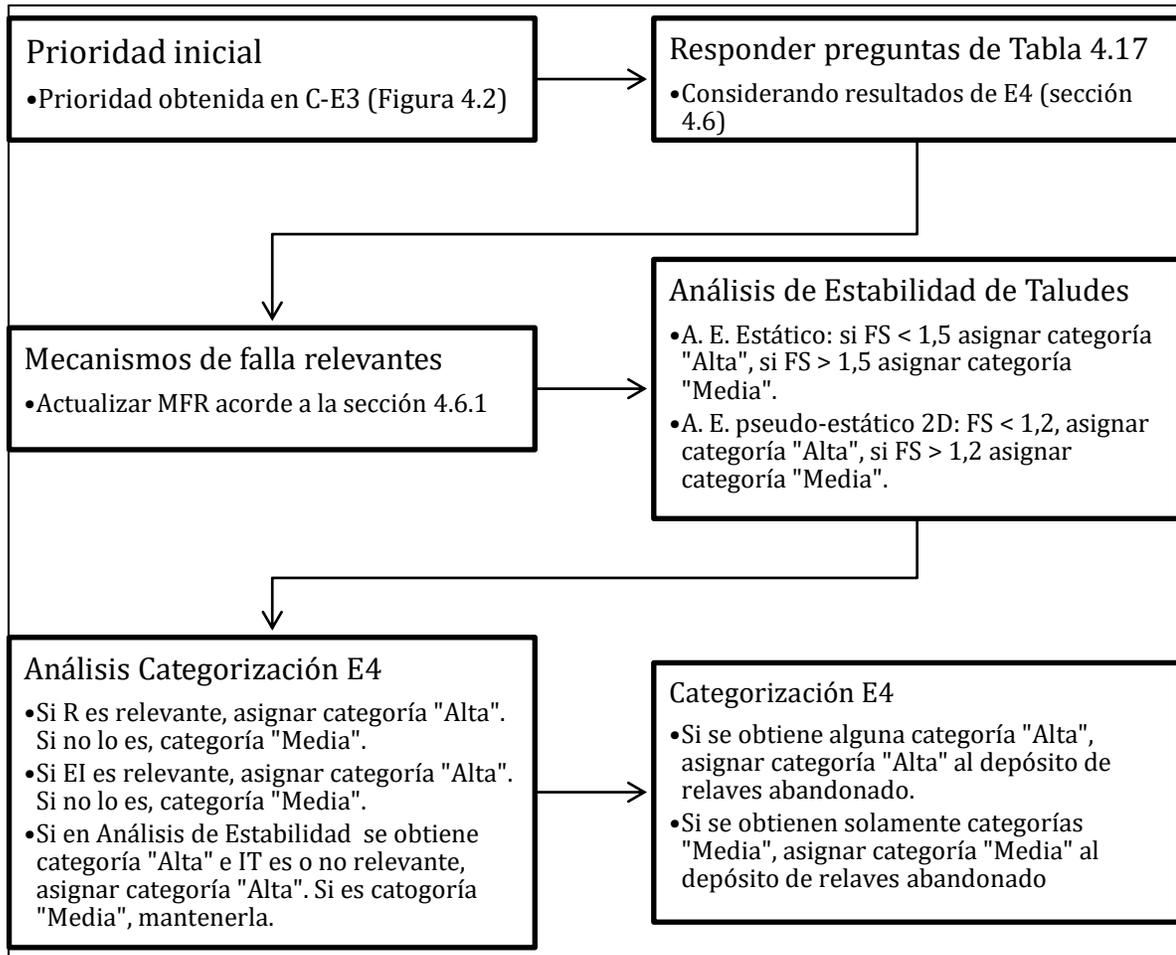


Figura 4.6 Diagrama de la Categorización de la Etapa 4 (P-E4)

Como se muestra en el extracto (Figura 4.7) de la Propuesta Metodológica (Figura 4.1), si la categoría es “*Media*”, el depósito abandona la Metodología y se le asigna un *Monitoreo Intermedio post Etapa 4 (MI4)*, descrito en la sección 4.8 más adelante. De lo contrario, vale decir si la categoría del depósito es “*Alta*”, el depósito continúa bajo análisis en la *Etapa 5*, descrita en la sección 4.9 más adelante.

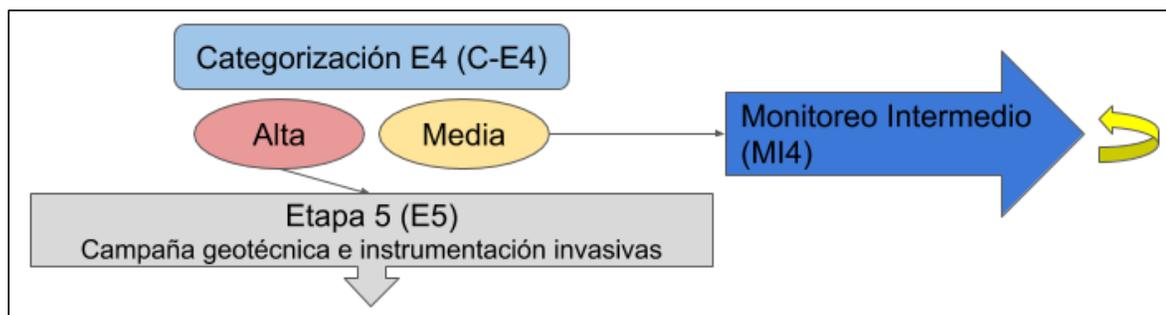


Figura 4.7 Extracto de Esquema de Propuesta Metodológica (C-E4 y E5).

4.8. Monitoreo Intermedio post Etapa 4 (MI4)

Posterior a la *Etapa 4*, se maneja mayor información sobre la geometría del depósito y se puede especular sobre el contenido de éste y, por ende, es posible tomar mejores decisiones. El *Monitoreo Intermedio posterior a la Etapa 4* (MI4) incorpora nuevos requerimientos en relación al Monitoreo Simple y altera la frecuencia de algunos ya presente. Estos nuevos requerimientos se describen a continuación y se resumen en la Figura 4.8 a continuación.

- Registros fotográficos: aumento de frecuencia en los registros fotográficos cada 3 meses. Esto con el objetivo de generar mayor cantidad de momentos de control y en las cuatro estaciones del año. Luego de 2 años, disminuir la frecuencia de los registros a 6 meses.
- Especificación sobre concentración de controles acorde a los mecanismos de falla actualizados en *Etapa 4*: según los MFR actualizados en la sección 4.6.1 y la información recopilada durante las cuatro etapas, el profesional encargado de aplicar la Metodología puede determinar zonas donde se puedan iniciar los diferentes mecanismos de falla relevantes y especificar controles acordes a la distribución de estas zonas.
- Complementar Línea de Base: con la información obtenida en terreno (cualitativa y cuantitativa), complementar la línea de base de la *Etapa 2*.
- Medición de deformaciones mediante instrumentos instalados en *Etapa 4*: controlar deformaciones por medio de los registros fotográficos usando como referencias los hitos topográficos instalados en la Etapa 4.

Mismos requerimientos que en Monitoreo Simple (MS), con mayor intensidad en frecuencia

- Revisión posterior a actualización del Catastro SERNAGEOMIN.
- Registros fotográficos cada 3 meses por 2 años (primavera, verano, otoño, invierno). Luego de los 2 años, registros fotográficos cada 6 meses. Observar:
 - humedad en muro y cubeta (IT, EI),
 - crecimiento de flora (IT, EI),
 - construcción de obras civiles en cercanías de depósito de relaves abandonado (viales, habitacionales) (IT, R),
 - formación de grietas en muro y cubeta (IT, EI),
 - deslizamientos en muro y cubeta (IT, EI)
- Buscar aparición de evidencias de los mecanismos de falla (EI, R, EI) en el registro fotográfico. De encontrarse, actualizar información en E2 y E3.

Especificar dónde concentrar controles acorde a las zonas de riesgo y los mecanismos de falla actualizados en Etapa 4.

Complementar Línea de Base

Medición de deformaciones mediante instrumentos instalados en Etapa 4

Figura 4.8 Descripción del Monitoreo Intermedio post Etapa 4 (MI4).

4.9. Etapa 5: Campaña geotécnica invasiva e instrumentación invasiva (E5)

Objetivo: Determinación de parámetros geotécnicos para generar un modelo de cálculo de estabilidad física más detallado. En caso de existir, determinar ubicación del nivel freático en muro, cubeta y suelo de fundación. Instalación de mayor cantidad de instrumentos para monitoreo.

Esta etapa consta de 3 procedimientos: campaña en terreno, instalación de instrumentos y campaña en laboratorio y gabinete, y se describen a continuación.

La descripción de las herramientas e instrumentos a utilizar en esta etapa, se describe en la sección 5.5 más adelante.

4.9.1. Campaña en terreno

Consiste en la realización de ensayos de terrenos comunes para exploraciones geotécnicas. Se proponen las siguientes exploraciones descritas en la Tabla 4.18. Para mayor detalle del procedimiento y resultados de cada una de estas, revisar el Anexo D.

Tabla 4.18 Propuesta de exploraciones en terreno para Etapa 5

Exploración	Ubicación	Cantidad mín. de ensayos por ubicación	Propósito
Sondaje o calicata	Muro de arena Cubeta Suelo de fundación	3	Ubicación del nivel freático Recuperación de muestras alteradas (tubo Shelby) e inalteradas
Cono de Arena	Muro de arena Cubeta Fondo de calicatas	1	Obtener densidad in situ superficial y en profundidad
Ensayo SPT	Muro de arena Cubeta	3	Perfil estratigráfico continuo Muestras
Ensayo de permeabilidad Método Lefranc	Muro de arena Cubeta	1	Obtener permeabilidad en terreno

4.9.2. Instalación de instrumentos

Los instrumentos instalados tienen por objetivo monitorear los parámetros críticos de los mecanismos de falla relevantes de cada depósito. Vale decir que, si se descarta un mecanismo de falla, no hay necesidad de monitorear esos parámetros.

En la Tabla 4.19 se proponen los instrumentos que hoy en día se utilizan para monitorear el nivel freático, la presión de poros, filtraciones, la geometría y desplazamientos, las deformaciones horizontales y las aceleraciones sísmicas

Tabla 4.19 Propuesta de monitoreo de un depósito de relaves abandonado para Etapa 5

Parámetro crítico	MRF	Instrumento (Referencia en Anexo C)	Frecuencia de medición	Comentarios	Distribución	Terreno o remoto
Nivel freático, presión de poros y filtraciones	IT EI	Piezómetros	5 veces al mes	Interfaz muro-suelo de fundación (determinar falla por deslizamiento horizontal) Nivel freático dentro de muro Aumento de mediciones frente a eventos naturales extremos	Al menos 1 en muro llegando a suelo de fundación	Remoto
Geometría y desplazamientos	IT R EI	Topografía (Anexo D)	2 veces al mes	Equipo topográfico (ET): estación total en zona fija y prismas (P). Se debe controlar: ángulo del talud, deformaciones (asentamientos diferenciales), pendiente de la playa, altura de revancha	ET: zona estable y fija (afloramiento rocoso y estribo). P: coronamiento y cara aguas abajo muro (c/15 m)	Terreno (*)
Deformaciones horizontales	IT EI	Inclinómetro	2 veces al mes	Instalación por medio de sondajes de E5	Al menos 1 en muro	Remoto
Aceleraciones sísmicas del muro	IT	Acelerógrafo	Frente a evento sísmico	Miden aceleración producida por evento sísmico en función del tiempo. Activación una vez superado cierto umbral de aceleración.	1 en coronamiento, 1 en aguas abajo de muro, 1 en afloramiento rocoso cercano	Remoto
Estado general del depósito	IT R EI	Inspección visual	1 vez al mes	Inspección visual según Anexo D que busca identificar y describir aspectos críticos del depósito (dimensiones, indicadores, características del entorno, medición y mantención de instrumentos)	Instalación de monolitos en cubeta cercana al muro (subsidiarias)	Terreno (*)

MFR: Mecanismo de falla relevante. IT: Inestabilidad de taludes. R: Rebalse. EI: Erosión interna.

En la última sección de la tabla, se establece si el instrumento es de aplicación en terreno o de manera remota. Además, se indica con un asterisco (*), los instrumentos que pueden ser reemplazados por la aplicación de herramientas satelitales, como la herramienta de Interferometría (descrita en sección 2.8.1.2). Se debe recalcar que la inspección visual en terreno puede ser una gran herramienta, y de ser posible, debe llevarse a cabo.

4.9.3. Campaña en laboratorio y trabajo en gabinete

Luego de campaña en terreno y la instalación de instrumentos, es necesario el trabajo en laboratorio y gabinete, que se describe en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20 Descripción de campaña en laboratorio y trabajo de gabinete de Etapa 5.

Campaña en laboratorio y trabajo en gabinete	Detalle	Referencia
Determinación de propiedades índice del material del muro, cubeta y suelo de fundación	Clasificación de suelos USCS	ASTM D 2487 NCh 1886
	Análisis granulométrico y descripción del material	NCh 1886
	Límites de Atterberg	NCh1517/1 NCh1517/2
	Peso unitario	NCh 1532 NCh 1117
	Gravedad específica	NCh 1532 NCh 1117
	Densidad relativa	NCh 1726
Parámetros geotécnicos del material del muro, cubeta y suelo de fundación	Cohesión	Corral, 2008
	Ángulo de fricción	
	Resistencia no drenada	
	Módulo de elasticidad	
Estudio Hidrológico	Crecida máxima	Sección 2.9.2
Estudio de riesgo sísmico	Evaluación de amenaza sísmica	Sección 2.9.1

Una vez realizada la campaña en laboratorio, se obtiene la caracterización de las propiedades mecánicas del relave, muro y suelo de fundación. Esta información permite realizar el Análisis de Estabilidad de Taludes (sección 2.9.3) con parámetros geotécnicos obtenidos en terreno, a diferencia de los parámetros inferidos en la *Etapa 4*.

De esta etapa se obtienen los parámetros geotécnicos del depósito (muro de arena, cubeta y suelo de fundación), informe Mecánica de Suelos, factor de seguridad para la estabilidad de taludes y una serie de instrumentos instalados en terreno. Con esto, se procede a la última etapa de la Metodología, llamada *Categorización de la Etapa 5* y descrita en la sección 4.10 más adelante.

4.9.4. Actualización de MFR posterior a Etapa 5

De manera similar a la sección 4.6.1, en la *Etapa 5* se incluye nueva información sobre el depósito. Ésta se obtiene directamente, y no por correlaciones.

En la Tabla 4.21 se presentan los parámetros críticos asociados a cada mecanismo de falla. En esta etapa, se es posible tener información respecto a cada uno de ellos.

Para actualizar los mecanismos de falla relevantes posterior a la *Etapa 5*, es necesario responder las preguntas de los MFR obtenidos en la *Etapa 4* (sección 4.6.1).

Si se obtienen respuestas que puedan propiciar los MFR determinados en la Etapa 4, éstos deben mantenerse como relevantes. En el caso contrario, vale decir que las condiciones del depósito son tales que se considera estable para cada uno de estos mecanismos, se dejan de considerar relevantes.

Tabla 4.21 Parámetros críticos asociados a mecanismos de falla relevantes en depósitos de relave abandonados.

Mecanismos de falla	Parámetros críticos
Inestabilidad de taludes (IT)	Ángulo del talud Deformaciones (asentamientos diferenciales) Deslizamientos en talud Grietas en el coronamiento Nivel freático del muro y depósito Presiones de poros del muro y depósito Granulometría del material del muro y cubeta Características mecánicas del material del muro y cubeta
Rebalse (R)	Altura de revancha Generación de laguna cerca del muro Pendiente de playa
Erosión interna (EI)	Flujo o humedad en muro (talud aguas abajo), estribos o pie de muro Evidencia de erosión retrógrada en talud aguas abajo Subsidiencias al pie del muro o cubeta cerca del muro Granulometría del material del muro Presión de poros al interior del muro y/o en el terreno de fundación

Tabla 4.22 Preguntas para actualizar los mecanismos de falla relevantes en el depósito de relaves abandonado en la Etapa 4.

Mecanismos de falla	Preguntas por parámetro crítico
Inestabilidad de taludes (IT)	¿El ángulo del talud es pronunciado? ¿Hay evidencias de deformaciones en el muro o cubeta cerca del muro? ¿Hay evidencias de deslizamientos en el talud o grietas en el coronamiento? ¿Existe nivel freático? ¿Cuál es su ubicación? ¿El factor de seguridad del análisis de estabilidad estático es mayor o menor a 1,5? ¿El factor de seguridad del análisis de estabilidad pseudo-estático es mayor o menor a 1,2?
Rebalse (R)	¿Existe revancha? ¿Es suficiente? ¿Es posible la generación de laguna cerca del muro? ¿La pendiente de la playa favorece la generación de laguna? Según su ubicación, ¿el depósito está expuesto a crecidas? Según la geometría, la crecida máxima y el régimen de lluvias, ¿se puede generar rebalse?
Erosión interna (EI)	¿Hay evidencias de zonas húmedas? ¿Hay evidencias de erosión retrógrada? ¿Hay evidencias de subsidencias en el pie del muro o cubeta cerca del muro? De existir estas evidencias, ¿existen sectores con suelos poco competentes? ¿Existe nivel freático capaz de generar erosión interna? ¿El material es erosionable?

4.10. Categorización de la Etapa 5 (C-E5)

La categorización de la Etapa 5 es la última instancia de decisión en la Metodología. Para esta categorización, es necesario considerar cuantos mecanismos de falla se consideran relevantes (sección 4.9.4). Si luego de responder las preguntas de la Tabla 4.22 se determina que no existen mecanismos de falla relevantes, al depósito de relaves abandonado se le debe asignar la categoría “Media”. En el caso contrario, vale decir, si existe al menos un (1) mecanismo de falla relevante, al depósito de relaves abandonado se asigna una categoría “Alta”.

Como se muestra en el extracto (Figura 4.9) de la Propuesta Metodológica (Figura 4.1), si la categoría es “Media”, el depósito abandona la Metodología y se le asigna un *Monitoreo Intermedio post Etapa 5 (MI5)*, descrito en la sección 4.11 más adelante. De lo contrario, vale decir si la categoría del depósito es “Alta”, el depósito abandona la Metodología y se le asigna un *Monitoreo Complejo (MC)*, descrito en la sección 4.12 más adelante.

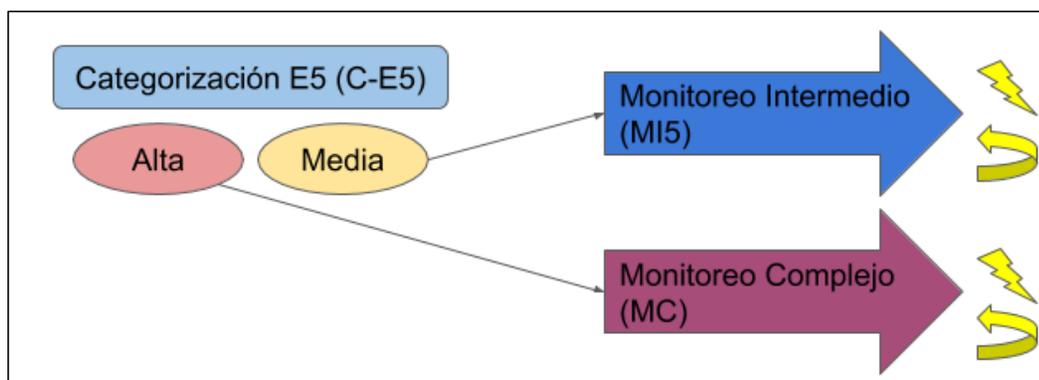


Figura 4.9 Extracto de Esquema de Propuesta Metodológica (C-E5, MI5 y MC).

4.11. Monitoreo Intermedio post Etapa 5 (MI5)

El Monitoreo Intermedio posterior a la Etapa 5 (MI5) es muy similar al MI4, salvo por el monitoreo mediante instrumentos instalados en terreno. Luego de la E5, se tiene información de parámetros geotécnicos, clasificación y propiedades del muro y cubeta.

La Figura 4.10 describe los requerimientos del Monitoreo Intermedio posterior a la Etapa 5 (MI5). A continuación, se describen los requerimientos que no se encuentran detallados en el MI4.

- Especificación sobre concentración de controles acorde a los mecanismos de falla actualizados en *Etapa 5*: según los MFR actualizados en la sección 4.9.4 y la información recopilada durante las cinco etapas, el profesional encargado de aplicar la Metodología puede determinar zonas donde se puedan iniciar los diferentes mecanismos de falla relevantes y especificar controles acordes a la distribución de estas zonas.
- Monitoreo de instrumentos instalados: los instrumentos instalados en *Etapa 4* (Tabla 4.15 en sección 4.6) corresponden a hitos topográficos. Estos pueden ser utilizados para el monitoreo de zonas críticas tanto en terreno como de manera remota, mediante imágenes satelitales. Además, pueden ser usados como puntos de referencia. Por su parte, los instrumentos instalados en *Etapa 5* detallan su frecuencia de medición en la Tabla 4.19.
- Revisión posterior a eventos extremos (sección 4.13): como se menciona previamente, una de las principales causas que gatillan una falla en los depósitos de relaves, tanto activos, inactivos como abandonados, son los eventos naturales extremos, como sismos y lluvias. En la sección 4.13 se describe esta revisión.

Mismos requerimientos que en Monitoreo Intermedio post Etapa 4 (MI4)

- Revisión posterior a actualización del Catastro SERNAGEOMIN
- Registros fotográficos cada 3 meses por 2 años (primavera, verano, otoño, invierno). Luego de los 2 años, registros fotográficos cada 6 meses. Observar:
 - humedad en muro y cubeta (IT, EI),
 - crecimiento de flora (IT, EI),
 - construcción de obras civiles en cercanías de depósito de relaves abandonado (viales, habitacionales) (IT, R),
 - formación de grietas en muro y cubeta (IT, EI),
 - deslizamientos en muro y cubeta (IT, EI)
- Buscar aparición de evidencias de los mecanismos de falla (EI, R, EI) en el registro fotográfico. De encontrarse, actualizar información en E2 y E3.
- Medición de deformaciones mediante instrumentos instalados en Etapa 4

Especificar dónde concentrar controles acorde a las zonas de riesgo y los mecanismos de falla actualizados en Etapa 5.

Monitoreo de instrumentos instalados (Figura 4.15)

Revisión posterior a eventos extremos (Sección 4.13).

Figura 4.10 Descripción del Monitoreo Intermedio post Etapa 5 (MI5).

4.12. Monitoreo Complejo (MC)

El Monitoreo Complejo (MC) consiste en las exigencias de mayor magnitud en términos de monitoreo de un depósito de relaves abandonado. El MC contempla los mismos requerimientos que el Monitoreo Intermedio MI5 e incluye una visita a terreno una vez al año. Esta visita se describe a continuación y los requerimientos se resumen en la Figura 4.11.

- Visita a terreno cada 1 año: esta visita tiene por objetivo realizar un mantenimiento a los instrumentos y equipos instalados, llevar a cabo la inspección visual descrita en el Anexo D para monitorear la aparición de evidencias de los MFR y, por último, reevaluar la necesidad de continuar con la aplicación del MC.

Se debe generar informe de estado del depósito de relaves abandonado y presentarlo a autoridad competente. Además, en esta etapa se recomienda aplicar medidas correctivas, no abordadas en este trabajo, para cada mecanismo de falla relevante.

Mismos requerimientos que en Monitoreo Intermedio post Etapa 5 (MI5)

- Revisión posterior a actualización del Catastro SERNAGEOMIN
- Registros fotográficos cada 3 meses por 2 años (primavera, verano, otoño, invierno). Luego de los 2 años, registros fotográficos cada 6 meses. Observar:
 - humedad en muro y cubeta (IT, EI),
 - crecimiento de flora (IT, EI),
 - construcción de obras civiles en cercanías de depósito de relaves abandonado (viales, habitacionales) (IT, R),
 - formación de grietas en muro y cubeta (IT, EI),
 - deslizamientos en muro y cubeta (IT, EI)
- Buscar aparición de evidencias de los mecanismos de falla (EI, R, EI) en el registro fotográfico. De encontrarse, actualizar información en E2 y E3.
- Especificar dónde concentrar controles acorde a las zonas de riesgo y los mecanismos de falla actualizados en Etapa 5.
- Monitoreo de instrumentos instalados en Etapa 4 y Etapa 5 (Tabla 4.15).
- Revisión posterior a eventos extremos (Sección 4.13).

Visita a terreno cada 1 año que tiene por objetivos:

- Mantenimiento de equipos
- Aplicación de partes de E4 y E5 para monitorear “avance” de evidencia de MFR.
- Reevaluar aplicación de MC según desempeño.

Figura 4.11 Descripción del Monitoreo Complejo (MC).

4.13. Revisión posterior a eventos extremos

De la sección 2.4, se desprende que gran parte de los incidentes que afectan a depósitos de relaves abandonados son generados por eventos naturales extremos. En Chile, los terremotos (50% de causas de incidentes) representan la mayor amenaza. Además, según los accidentes a nivel mundial y la tendencia nacional, las precipitaciones extremas, acompañadas de crecidas importantes de afluentes y aluviones. Por esto, se debe poner especial atención a los depósitos de relaves abandonados que se expongan a eventos naturales de esta magnitud.

En la Metodología, tal como indica la Figura 4.1, esta revisión se aplica en los depósitos de mayor riesgo, vale decir, los que alcancen la *Etapa 5* y por ende se les asigne un *Monitoreo Intermedio post Etapa 5* o *Monitoreo Complejo*.

Las recomendaciones para esta revisión son las expuestas en la Figura 4.12.

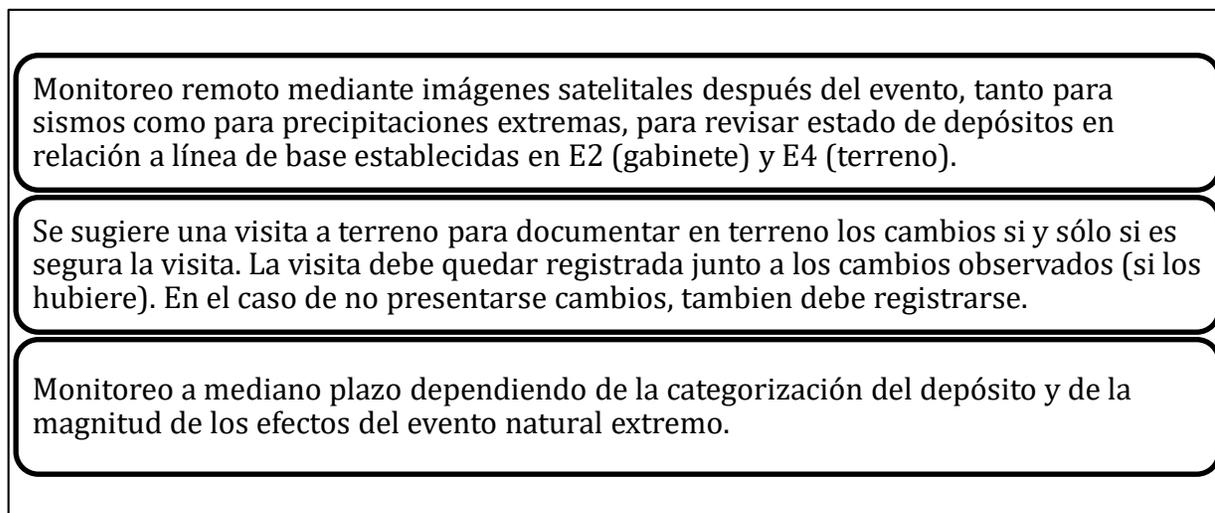


Figura 4.12 Descripción de Revision posterior a eventos extremos.

En el caso de los sismos, es necesario un monitoreo de las deformaciones inducidas por este evento, como se realiza en la *Etapa 3* (sección 4.3 más atrás) por medio de interferometría.

En el caso de precipitaciones extremas, hay que revisar evidencias de erosión superficial, la posible generación de laguna y cómo afecta esto a la estabilidad del depósito (¿existe disminución de revancha? ¿Hay erosión de pie de muro? ¿Hubo una crecida importante que pueda afectar al depósito?). Para este último punto, es necesario el monitoreo de tiempo de secado o infiltración de la laguna generada. Esto se puede realizar mediante imágenes satelitales (*Etapa 2*, sección 4.2 más atrás) o visitas a terreno.

5. Instrumentos a utilizar

La intención de este capítulo es mencionar, de manera independiente, las herramientas utilizadas para la metodología. Esto se justifica por el acelerado desarrollo de tecnologías, aumentado la calidad de información que se puede obtener, y disminución de los costos asociados.

A continuación, se especifican las herramientas y fuentes de información para cada una de las etapas.

5.1. Etapa 1

Para la categorización inicial en gabinete del depósito de relaves abandonado se sugiere el uso de información disponible en el SERNAGEOMIN, tales como el Catastro de Depósitos de Relaves (2019) y los mapas de peligro volcánico, el aporte realizado al catastro mencionado anteriormente (Anexo B),

Para diversos aspectos a evaluar se utilizan imágenes satelitales, las cuales pueden ser gratuitas, como las disponibles en Google Earth, o pagadas, como las de Geocento (sección 2.8.1.1). Al ser una primera categorización, se recomienda el uso de fuentes de información gratuita, como la red de Datos Geoespaciales de Chile (IDE-Chile), de bibliotecas, y algunas fuentes a las que pueda tener acceso SERNAGEOMIN, como su Biblioteca u otras entidades del gobierno, que también pueden ser útiles.

También se recomienda el uso de cartas geológicas de alta resolución, registros comunales de propiedad o construcción, o cualquier otra fuente que permita obtener esta primera categorización.

Se espera que esta Metodología sea aplicada por un ente como el SERNAGEOMIN, por lo que el acceso a documentos del Ministerio de Obras Públicas, Biblioteca, o entidades similares, sea expedito.

5.2. Etapa 2

Como se menciona previamente, la inversión de recursos debe responder a la importancia que tiene el depósito. Para un depósito importante, será necesario invertir en imágenes de mayor calidad.

En ese sentido, la creación del modelo DEM estará supeditada a la inversión de recursos destinado al depósito de relaves abandonado. En la sección 2.8.1.3, los DEM se pueden obtener desde sistemas satelitales por medio de imágenes estereoscópicas o por sistemas de radar. La plataforma ASTER entrega resoluciones de hasta 15 metros por pixel de manera gratuita, mientras que QuickBird, puede entrar imágenes para generar DEM de resolución de 0,61 metros por pixel. En Chile, CIREN provee DEM pagados de alta resolución (5 cm por pixel).

Por otro lado, reproducir la historia constructiva y operacional del depósito de relaves abandonado se pueden emplear múltiples fuentes. Mediante imágenes satelitales, pagadas o gratuitas, obtenidas de fuentes tan variadas como diarios, ministerios, Fuerzas

Armadas, bibliotecas, pobladores del lugar, entre otras, se puede restaurar esta variable y su método constructivo. Es necesario encontrar imágenes de, al menos, la segunda parte del Siglo XX, donde se cree fueron construidos estos depósitos.

Para la creación de los modelos DEM se pueden utilizar los programadas mencionados en la sección 2.8.1.3, como Surfer e IDRISI, y las extensiones Spatial Analyst y 3D Analyst de ArcView.

5.3. Etapa 3

Para obtener las tendencias históricas de deformaciones verticales y horizontales se debe aplicar la técnica de interferometría diferencial, descrita en la sección 2.8.1.2. Esta técnica requiere el uso de 2 o más imágenes de un radar de apertura sintética, ya sea preprocesado o producido por InSAR. Estas imágenes se pueden obtener de satelitales u otras fuentes, como drones o equipos terrestres equipados con radares. Desde 2004, el satélite Sentinel-1, ERS, Envisat-ASAR, TerraSAR-X, entre otros, proveen este tipo de imágenes de radares gratuitas.

Existe gran variedad de softwares de uso común para el procesamiento InSAR, varios disponibles gratis, como GMTSAR, DORIS y Orfeo ToolBox, entre otros.

Nuevamente, se debe considerar la categoría del depósito de relves al momento de comprar imágenes de radar.

Para la determinación de los mecanismos de falla, se deben revisar la existencia o superación de umbrales de los parámetros críticos expuestos en la Tabla 4.13 y se recomienda el uso de los árboles de falla para cada uno de estos mecanismos (Carvajal, 2017).

5.4. Etapa 4

Esta etapa considera el primer esfuerzo en terreno de la Metodología. A continuación, se describen las herramientas según los objetivos de la sección 4.6.

- Determinar geometría superficial: esto se puede realizar por medio de múltiples técnicas. Se recomienda una técnica fácil, de rápida aplicación y capaz de cubrir grandes superficies. La técnica de procesamiento de imágenes llamada fotogrametría permite llevar fotografías 2D a modelos 3D. Núñez (2019) describe en profundidad el uso de esta técnica, realizando la medición de una cantera de áridos y finos, similar a un depósito de relaves abandonado. Además, se incluye una propuesta metodológica para la aplicación de esta técnica.
- Estimación del perfil stratigráfico: se deben combinar resultados de la investigación geofísica y los ensayos destructivos someros. El uso de geófonos triaxiales permite aplicar la técnica de Nakamura, que entrega un periodo predominante T de la cubeta y muro, y la técnica MASW, de la que se puede inferir el perfil de velocidades de onda de corte V_s . Al combinar ambos resultados, se puede obtener un perfil stratigráfico de la cubeta, muro y la frontera aproximada entre el depósito de relaves abandonado y la cuenca de emplazamiento. El detalle de estas técnicas, se encuentra en el Anexo D. Los ensayos destructivos someros

por medio de penetrómetros, como PANDA y DCP, entregan índices de penetración de los primeros 6 metros del lugar estudiado que se puede relacionar con un amplio rango de parámetros.

- Estimación del nivel freático: se deben analizar los resultados de la investigación geofísica. Mediante electrodos y voltímetros, se pueden aplicar las técnicas de resistividad eléctrica y la de potencial espontáneo, descritas en el Anexo D. Ambas, por medio de las mediciones superficiales de diferencias de potenciales eléctricos, entregan información del subsuelo. Se puede inferir características como la ubicación del agua, además de la ubicación del estrato rocoso, infiltraciones, heterogeneidades, entre otras.
- Instalación de hitos topográficos: los hitos topográficos se describen en el Anexo C y deben ser reconocidos desde imágenes satelitales, por lo que se sugiere la elección de un color que destaque.
- Establecer línea de base en terreno: en el Anexo D se enumera una serie de aspectos a considerar en la inspección visual de un depósito de relaves.

Lo descrito en la sección 5.3 referente a los mecanismos de falla relevantes, aplica de igual manera en esta etapa.

5.5. Etapa 5

La Etapa 5, última en esta propuesta, guarda gran similitud con una campaña de exploración geotécnica y monitoreo estándar.

Obtener los parámetros geotécnicos para generar un modelo de cálculo de estabilidad física más detallado se deben realizar sondajes o calicatas en terreno para ubicar el nivel freático y recuperar muestras de suelo en tanto en el muro, cubeta y suelo de fundación. Estas exploraciones pueden realizarse de manera manual o sumarse a la realización del ensayo SPT del que se obtiene un perfil estratigráfico continuo, que se pueden correlacionar con parámetros de resistencia. Estas muestras se utilizan para realizar los ensayos en laboratorio para determinar los parámetros geotécnicos y la determinación de las propiedades índice de estos materiales (Tabla 4.20). En la superficie del relave, muro y fondo de calicatas, se debe realizar el ensayo de Cono de arena para obtener la densidad in situ para lograr la misma compactación en laboratorio. En superficie, se debe realizar el ensayo de Permeabilidad para obtener el coeficiente de permeabilidad en terreno.

La instalación de instrumentos representa la mayor intervención en el depósito. En la Tabla 4.19 se describe el parámetro crítico a monitorear junto al Mecanismo de falla relevante (MFR) al cual está asociado, el instrumento utilizado para el monitoreo, la frecuencia de medición, la distribución y si es posible el monitoreo de manera remota o en terreno, junto a algunos comentarios.

La decisión de instalación de cada instrumento debe responder a la eventual generación de los mecanismos de falla asociados a cada parámetro crítico. Esto quiere decir que, si no es posible la generación de cierto mecanismo de falla, no se recomienda la instalación de aquel instrumento. Lo descrito en la sección 5.3 referente a los mecanismos de falla relevantes, aplica de igual manera en esta etapa.

6. Aplicación de la Propuesta Metodológica

La Propuesta Metodológica descrita en los Capítulos 4 y 5 se compone de diferentes etapas, categorizaciones y monitoreos. Algunos componentes de la Metodología demandan gran cantidad de capital, mientras que otros solamente utilizan recursos humanos.

En el presente capítulo se busca poner a prueba la propuesta mediante su aplicación a tres depósitos de relaves abandonados en Chile. En específico, se aplicará la Etapa 1, cuya principal característica radica en su aplicabilidad remota, con nulo costo de capital y realizado por una persona.

En primer lugar, se presentan los criterios de elección de los depósitos de relaves abandonados. Luego, los resultados obtenidos, y, finalmente, la discusión de resultados.

6.1. Elección de depósitos

Los criterios de elección son:

- La priorización que realiza el SERNAGEOMIN, junto al SEA y Ministerio de Minería, que resulta en una lista de 37 faenas que generan riesgos físicos y químicos (sección 2.7.12.7). De éstas, 11 son depósitos de relaves abandonados y se encuentran identificados en el Anexo B con color verde.
- Identificación de zonas pobladas con alta exposición a la actividad minera.
- El impacto ambiental de la construcción no regulada de estructuras mineras en las cercanías de zonas de interés turístico.

Utilizando estos criterios, se escogen tres depósitos de relaves abandonados, caracterizados en la Tabla 6.1 más adelante.

De la propuesta presentada en el Capítulo 4, es factible aplicar la Etapa 1 debido a las restricciones de este trabajo académico, por las limitaciones en el uso de la interferometría (Etapa 3) y la baja resolución de los DEM gratuitos disponibles (Etapa 2).

6.2. Resultados de aplicación de Etapa 1

La Etapa 1 consiste en obtener una categoría inicial del depósito de relaves abandonado por medio de la asignación de un puntaje a características críticas y la posterior suma ponderada de estos puntajes. Los aspectos a evaluar y ponderadores son los que aparecen en la Tabla 4.12 y las fuentes utilizadas para esta etapa se detallan en la Tabla 6.2 a continuación.

Tabla 6.1 Depósitos de relaves abandonados en Chile escogidos para la aplicación de la Etapa 1 de la Propuesta Metodológica.
(Adaptado de SERNAGEOMIN, 2019a)

Caso	ID	ID SNGM	Empresa	Faena	Región	Comuna	UTM Norte	UTM Este
1	4	171	La Paciencia (Hans Hein Staeger)	La Paciencia	V	Rinconada	6365463	339764
2	76	268	Suc. Tomas Whittle	Planta Whittle	IV	Andacollo	6653844	99468
3	56	1117	Desconocido	Puerto Cristal	XI	Río Ibáñez	4838319	240279

Nota ID: Corresponde al ID asignado al depósito de relaves abandonado en este trabajo.

ID SNGM: Corresponde al ID asignado al depósito de relaves abandonado por el SERNAGEOMIN.

Tabla 6.2 Fuentes de información utilizadas para la Etapa 1.

Aspectos	Fuentes
(1) Tipo de tranque	Imágenes satelitales de Google Earth
(2) Edad del depósito	Existencia del depósito en imágenes de Google Earth antiguas
(3) Método constructivo	Catastro SERNAGEOMIN (SERNAGEOMIN, 2019A)
(4) Cercanía a puntos de interés	Capítulo 3
(5) Altura inferida	Capítulo 3
(6) Fallas geológicas	Carta Geológica del área escala 1:100.000 Quillota – Portillo; Andacollo – Puerto Aldea; Puerto Guadal – Puerto Sánchez
(7) Sismicidad	Figura 4.1 de NCh433
(8) Exposición a crecidas y escorrentías	Inferido de información del presente trabajo
(9) Volcanismo	Capítulo 3

Luego de esta investigación, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 6.3. La conversión de estas prioridades a puntajes se hace según la distribución de la Tabla 4.1 y se muestra, junto a la ponderación y suma ponderada, en la Tabla 6.4, Tabla 6.5 y Tabla 6.6 para los depósitos La Paciencia, Planta Whittle y Puerto Cristal, respectivamente.

Tabla 6.3 Resultados de investigación para Etapa 1.

Aspectos	Criterios	La Paciencia	Planta Whittle	Puerto Cristal
(1) Tipo de tranque	Tabla 4.2	Alta Tipo 1	Media Tipo 5	Alta Tipo 6
(2) Edad del depósito	Tabla 4.3	Baja Al menos 35 años (1984)	Baja Al menos 35 años (1984)	Media Al menos 35 años (1984) Cierre en 1993
(3) Método constructivo	Tabla 4.4	Alta S/I	Alta S/I	Alta S/I
(4) Cercanía a puntos de interés <i>Categoría global</i>	Tabla 4.5	Alta	Alta	Alta
(5) Altura inferida	Tabla 4.7	Baja 3.6	Media 8.7	Media 2.7
(6) Fallas geológicas	Tabla 4.8	Media	Baja	Alta
(7) Sismicidad	Tabla 4.9	Alta Zona 3	Alta Zona 3	Media Zona 1
(8) Exposición a crecidas y escorrentías	Tabla 4.10	Alta Al lado de un canal	Media A 250 metros de un estero en ciudad	Alta En la ribera del Lago G. Carrera
(9) Volcanismo	Tabla 4.11	Baja 190 km	Baja 370 km	Baja 253 km

Tabla 6.4 Ponderación y suma de puntajes ponderados para depósito de relaves abandonado La Paciencia.

Aspecto	Ponderador	La Paciencia	
		Puntaje	Puntaje Ponderado
(1) Tipo de tranque	0.10	3	0.30
(2) Edad del depósito	0.05	1	0.05
(3) Método constructivo	0.10	3	0.30
(4) Cercanía a puntos de interés	0.25	3	0.75
(5) Altura inferida	0.10	1	0.10
(6) Fallas geológicas	0.10	2	0.20
(7) Sismicidad	0.15	3	0.45
(8) Exposición a crecidas y escorrentías	0.10	3	0.30
(9) Volcanismo	0.05	1	0.05
Suma de puntajes ponderados			2.5

Tabla 6.5 Ponderación y suma de puntajes ponderados para depósito de relaves abandonado Planta Whittle.

Aspecto	Ponderador	Planta Whittle	
		Puntaje	Puntaje Ponderado
(1) Tipo de tranque	0.10	2	0.20
(2) Edad del depósito	0.05	1	0.05
(3) Método constructivo	0.10	3	0.30
(4) Cercanía a puntos de interés	0.25	3	0.75
(5) Altura inferida	0.10	2	0.20
(6) Fallas geológicas	0.10	1	0.10
(7) Sismicidad	0.15	3	0.45
(8) Exposición a crecidas y escorrentías	0.10	2	0.20
(9) Volcanismo	0.05	1	0.05
Suma de puntajes ponderados			2.3

Tabla 6.6 Ponderación y suma de puntajes ponderados para depósito de relaves abandonado Puerto Cristal.

Aspecto	Ponderador	Puerto Cristal	
		Puntaje	Puntaje Ponderado
(1) Tipo de tranque	0.10	3	0.30
(2) Edad del depósito	0.05	1	0.05
(3) Método constructivo	0.10	3	0.30
(4) Cercanía a puntos de interés	0.25	3	0.75
(5) Altura inferida	0.10	2	0.20
(6) Fallas geológicas	0.10	3	0.30
(7) Sismicidad	0.15	2	0.30
(8) Exposición a crecidas y escorrentías	0.10	3	0.30
(9) Volcanismo	0.05	1	0.05
Suma de puntajes ponderados			2.55

Según la distribución de categorías mostrada en la Figura 4.2, el depósito Puerto Cristal tiene una categoría “Alta”, mientras que el depósito Planta Whittle tiene una categoría “Media”. Por su parte, el depósito Planta Whittle tiene un puntaje de 2,5; valor límite que divide las categorías “Media” y “Alta”, caso no estudiado previamente. Sin embargo, se le asigna la categoría “Alta”.

6.3. Análisis de resultados

Es importante destacar la facilidad de aplicación de la Etapa 1, la cual fue realizada desde un computador con acceso a internet. Sin embargo, la calidad de la información obtenida puede mejorarse, invirtiendo recursos en la compra de imágenes históricas de mayor resolución a las que existen hoy, cartas geológicas de menor escala, información en terreno obtenida previamente, entre otros.

Como se explica en la sección 9.1 más adelante, esta etapa puede ser usada para priorizar entre depósitos, determinando cual es más urgente de estudiar. En este caso, se deben ordenar los puntajes de mayor a menor, por lo que el orden de estudio sería Puerto Cristal, La Paciencia y Planta Whittle. Llama mucho la atención que aun cuando el depósito Planta Whittle se encuentra ubicado dentro de un centro urbano, no se encuentre con categoría “Alta”, por lo que sus otros aspectos lo ponen en desventaja con los otros dos.

La revisión de otras iniciativas en búsqueda de, por ejemplo, alturas y superficies con mayor precisión, puede ayudar a obtener una categorización más precisa. Valdebenito

(2015) entrega información detallada de Planta Whittle, donde se expone que éste depósito tiene una cubeta plana de dimensiones aproximadas de 52 metros de largo por 32 metros de ancho, lo que equivale a un área de 1.664 metros. Por otro lado, posee alturas diferenciadas en los sectores norte (26 metros), este (8 metros), oeste (28 metros) y sur (4 metros). Si se promedian estas alturas, se obtiene una media de 16 metros, casi duplicando la altura inferida, de 8,7 metros (Tabla 6.3). La fuente de error para esta última puede deberse al cálculo de áreas de los depósitos en ArcMap y al volumen autorizado del Catastro de SERNAGEOMIN (2019). Según la información de Valdebenito (2015), el depósito posee un volumen aproximado de 26.624 m³, muy similar a los 20.056 m³ que aparecen en el Catastro de SERNAGEOMIN (2019). Ahora, si se considera esta nueva altura, la categoría de altura inferida aumentaría de “*Media*” a “*Alta*” y, en consecuencia, aumentando el puntaje global de 2,3 a 2,4. En este caso, y solamente investigando la altura inferida no se obtiene un cambio de categoría, pero podría ocurrir al mejorar la información.

En lo que se refiere a los ponderadores, éstos son muy influyentes en el resultado final. Es necesaria la opinión de expertos para validarlos, tal como expone Figueroa (2011). Se puede sugerir la eliminación de ciertos aspectos en función de su existencia o influencia en el depósito. Por ejemplo, la distancia al volcán activo más cercano de tres depósitos es, en su mayoría, casi superior a 200 kilómetros, por lo que este aspecto es, en opinión de la autora, irrelevante. Sin embargo, se conserva en la Metodología por la eventual aparición de depósitos ubicados en las cercanías de volcanes activos.

En contraste a la eliminación del aspecto, podrían existir otras medidas, como desagregar las categorías creando nuevas clasificaciones, como “Medianamente baja” o “Altísima”. Esto conlleva a nuevos puntajes y una nueva distribución de categorías, y, eventualmente, nuevas categorías. Igualmente, se sugiere evaluar la distribución de categorías de este trabajo. Por ahora, se divide en cuatro el segmento entre los puntajes de las categorías “*Alta*” y “*Baja*”, entregando tramos de 0,5 puntos. Los puntos de cambio son 2,5 y 1,5; haciendo el tramo de categoría “*Media*” el más largo. Es posible que el cambio de esta distribución pueda permitir tomar mejores decisiones y priorizar de mejor manera.

7. Análisis y Discusión

A nivel nacional y mundial, es abundante la investigación relacionada con la estabilidad física de los depósitos de relaves, pero muy pobre para los depósitos de relaves abandonados. Por otro lado, es evidente la preocupación de los actores públicos y privados por la integridad estructural de los depósitos de relaves abandonados, pero falta la aplicación de instrumentación y monitoreo para determinar sus propiedades y el comportamiento de estas obras frente a solicitaciones sísmicas y eventos naturales extremos.

Es amplia la literatura sobre la descripción de los eventos gatilladores, parámetros críticos y mecanismos de falla de los depósitos de relaves en general, pero es necesario acotar y discernir si son aplicables a los depósitos de relaves abandonados, ya que poseen condiciones diferentes, como el cese de operaciones, aumento paulatino de la resistencia al corte por la disminución de humedad, compactación y cementación, junto a otros factores.

De la revisión de antecedentes normativos y manuales de buenas prácticas en Chile y el mundo se destaca la similitud de exigencias entre los países estudiados. Además, se debe destacar que hoy en día es muy difícil la aparición de nuevos depósitos de relaves abandonados, salvo que no hayan estado catastrados. Existen, a nivel mundial, guías y reglamentos que regulen el ciclo de vida de los depósitos de relaves (construcción, operación y cierre), además de interés a nivel gubernamental para velar por la estabilidad física de estas estructuras. No obstante, aún está pendiente hacerse cargo de los depósitos de relaves abandonados; se encuentra a nivel mundial sólo una iniciativa encargada del manejo y rehabilitación de minas abandonadas y huérfanas.

En relación a las tecnologías y estado del arte de la instrumentación y monitoreo de los depósitos de relaves abandonados, se ha encontrado escasa información en la literatura. Existe cuantiosa información sobre el monitoreo e instrumentos utilizados en depósitos de relaves activos, aunque no es posible la aplicación directa de éstas a los depósitos de relaves abandonados por un tema de recursos y falta de presencia de personal en obra. Se ha innovado y avanzado en tecnologías que permitan un monitoreo remoto, factor esencial en la instrumentación de este tipo de estructuras abandonadas.

A nivel mundial, no parece existir un documento que establezca procedimientos para ayudar a entender la condición de estabilidad física de depósitos de relaves abandonados, por lo que este documento corresponde a un primer acercamiento a la creación de esta herramienta. Por sus particularidades (ausencia de información en todo ámbito), la metodología pretende investigar y dar respuesta a las preguntas que van surgiendo a medida que se avanza en la propuesta, cuya estructura busca aumentar la información disponible etapa a etapa con el objetivo de tomar decisiones con mayores y mejores datos.

De la información revisada, se desprende la existencia de herramientas que permiten el monitoreo remoto de estructuras, la falta de información relativa a los depósitos de relaves abandonados, tales como su método constructivo y geometría, y la ausencia de una metodología que describiera un procedimiento para determinar el nivel de instrumentación necesaria para monitorear los depósitos de relaves abandonados en

Chile. Frente a esta necesidad, se propone una metodología que pudiera cumplir con estos objetivos.

Las etapas en gabinete (E1, E2 y E3) son considerados los procesos mínimos para el seguimiento de un depósito de relave abandonado. La revisión del riesgo (vulnerabilidad y amenazas) junto a las consecuencias de un eventual incidente en el depósito, realizados en E1, permite dimensionar la importancia de cada depósito para la sociedad. Establecer el estado actual del depósito (E2) y el movimiento histórico reciente (E3) del depósito de relaves abandonado es imprescindible a la hora de evaluar su estabilidad física, puesto que es necesario establecer en qué situación se encuentra hoy el depósito para su monitoreo futuro. Por su parte, las etapas en terreno (E4 y E5) son similares a las exploraciones geotécnicas y geofísicas que se encuentran en el estado de práctica. Las exploraciones geofísicas recomendadas tienen por objetivo conocer la estructura interna desde la superficie del depósito y forma de la cuenca, permitiendo una mejor ubicación y distribución de las prospecciones y ensayos de la Etapa 5.

Los momentos llamados Categorización (C-E3, C-E4 y C-E5) corresponden a instancias terminales de la propuesta. En cada una de estas categorizaciones, se debe tener en cuenta que las decisiones tomadas impactan directamente en la importancia y posible continuación del depósito en la Metodología, y, por ende, la eventual aplicación de medidas que requieran un mayor gasto de recursos económicos y humanos.

Las propuestas de monitoreo (MS, MI4, MI5 y MC) representan uno de los productos más relevantes de este trabajo. Son acumulativos, vale decir, lo propuesto en el MS se utiliza en los siguientes; lo de MI4 se incluye en MI5, y así sucesivamente. El Monitoreo simple (MS) responde a los requerimientos de un depósito de baja prioridad, donde las medidas de monitoreo son remotas y espaciadas en el tiempo. Los Monitoreos Intermedios (MI4 y MI5) también tienen medidas remotas, pero se complementan con la información de la Línea de Base en Terreno provistas por la E4 y E5. Por último, el Monitoreo Complejo (MC) guarda relación con lo que hoy se exige y acostumbra en depósitos activos: monitoreos mediante instrumentos instalados en terreno, más lo correspondiente al MI5.

La propuesta de la revisión posterior a eventos extremos también es una costumbre en depósitos que cuentan con un dueño conocido. En la gran minería se cuenta con estaciones meteorológicas para la prever frentes de mal tiempo y ante sismos de gran envergadura, existen protocolos de acción. Esto es posible ya que existe un ente encargado de la estructura.

La información reunida en cada una de las etapas de la metodología debe quedar a libre disposición y uso de las autoridades competentes y de la comunidad científica para un darle continuidad a estudios y aplicación de nuevas tecnologías.

Como se explica en la sección 9.1 más adelante, esta propuesta puede ser aplicada a la totalidad de los depósitos de relaves abandonados, permitiendo la determinación de cual es más urgente de estudiar. En ese sentido, es necesario discriminar con una nueva etapa de categorización posterior a la Etapa 1, llamada Categorización de la Etapa 1 (C-E1), donde la categoría asignada determine cuál(es) depósito(s) de relaves abandonado(s) deben ser analizados primero en la Etapa 2.

Se debe destacar la facilidad de aplicación de la Etapa 1 demostrada en el Capítulo 6 más atrás, realizada mediante un computador con acceso a internet. La calidad de la información recopilada puede mejorarse, mediante la inversión de recursos en la compra de imágenes históricas de mayor calidad, cartas geológicas de mayor precisión; revisión de proyectos de investigación como trabajos de título o iniciativas de entes públicos o privados; entre otros.

Como se menciona previamente, es necesaria la validación de la metodología antes de ser aplicada. Esto puede lograrse mediante un comité de expertos que evalúe la aplicación de la Metodología a depósitos de relaves abandonados que ya hayan fallado o la implementación piloto sobre un grupo de depósitos. Además de la validación a la Metodología completa, los ponderadores también deben someterse a escrutinio.

8. Conclusiones

Los depósitos de relaves abandonados, a pesar de ser insignificantes en volumen comparados a los depósitos activos e inactivos (los activos acumulan el 90,6%, los inactivos el 9,3%, mientras que los abandonados el 0,1%), la principal relevancia éstos es su estado de abandono por parte de sus antiguos dueños y la ausencia de información de sus procesos constructivos, operacionales y de cierre.

De la revisión de antecedentes, se desprende la preocupación de los interesados por conocer la condición de estabilidad física de los depósitos de relaves. Históricamente, la principal fuente de información respecto a la pérdida de estabilidad han sido los incidentes ocurridos en el mundo. Chile debe considerar su condición sismotectónica en las metodologías de estudio, ya que es la principal fuente de pérdidas de estabilidad. Se menciona que no se suelen reportar incidentes pequeños, ya sea por miedo a la opinión pública o por otras razones. Sin embargo, este registro es de vital importancia para entender los fenómenos que ocurren y así poder intentar evitar futuras fallas. Empresas privadas y entes gubernamentales debieran exigir los reportes y análisis de causas de todos los incidentes.

Acorde al Catastro del SERNAGEOMIN y a la información incorporada obtenida de este trabajo, del total de depósitos de relaves del país, los abandonados representan el 0,1% en volumen del total de relaves, cerca del 60% no posee información sobre su método constructivo y un porcentaje similar (61%) se concentran en la IV Región de Coquimbo. Además, 119 no presentan un muro claro y 25 evidencian derrame, características que suponen un riesgo a las personas y medioambiente. Con el objetivo de determinar la condición de estabilidad de los depósitos de relaves, primero es necesario realizar un seguimiento de su estado, determinando con exactitud su condición inicial y controlando posibles apariciones de evidencias de los mecanismos de falla que dominan las inestabilidades físicas.

Como fruto de este trabajo, entre otras cosas, se complementa el primer Catastro de depósitos de relaves abandonados en Chile, que corresponde al trabajo realizado por SERNAGEOMIN y complementado con información obtenida para este trabajo de título, incluido en el Anexo B. El análisis del catastro da cuenta de la poca información disponible sobre el método constructivo y volumen almacenado en el depósito. Se complementa con información sobre su ubicación, distancia relativa a zonas y puntos de interés y una altura promedio inferida.

Existen métodos de monitoreo en depósitos de relaves activos e inactivos que se podrían aplicar a los depósitos de relaves abandonados. Pero al contar con menos recursos, es necesario proponer una forma de discriminar la aplicación de las diferentes tecnologías, y sobretodo, aplicarlas de manera eficiente. El uso de instrumentos de monitoreo remoto se vuelven atractivo precisamente por su aplicación desde una fuente lejana.

El rápido avance tecnológico en la actualidad permite monitoreos remotos y precisos de un sinnúmero de parámetros. Sin embargo, aún queda mucho por trabajar. La estandarización de procedimientos y herramientas permite la comparación y trabajo con multiplicidad de datos y localizaciones.

Se considera que existen tres mecanismos que controlan las fallas en depósitos de relaves, los cuales son inestabilidad de taludes, erosión interna y rebalse. Conocer estos mecanismos, junto a sus parámetros críticos y las manifestaciones de los síntomas de cada uno, es vital para controlar y evitar accidentes. Los depósitos de relaves abandonados tienen condiciones diferentes a los depósitos de relaves con dueños (activos e inactivos): no reciben relaves nuevos, no poseen laguna (la mayor parte del tiempo), no son monitoreados de manera constante, cuentan con poca o ninguna información sobre su construcción, operación y cierre, entre otras condiciones. Esta propuesta busca esclarecer parte de esta información y poder aplicarla para determinar si los mecanismos de falla pueden generarse e inducir un accidente o falla.

La metodología contenida en este documento representa el primer acercamiento a la creación de una herramienta que esboza un procedimiento de instrumentación de un depósito de relaves abandonado y que, si bien tiene asociadas incertidumbres significativas debido a la falta de validación y aplicabilidad de la herramienta, se sientan las bases para el procedimiento.

La división de etapas en gabinete y terreno admite la aplicación de tecnologías de manera incremental, decidiendo en cada etapa los procedimientos necesarios para el nivel de detalle e información requeridos. Las propuestas de monitoreo corresponden a uno de los resultados más importantes de este trabajo. La separación acorde al nivel de importancia del depósito discrimina la cantidad de recursos a utilizar en el depósito, junto a la calidad y cantidad de las técnicas de monitoreo.

Separar la metodología conceptual y las herramientas utilizadas no condiciona el uso de nuevas tecnologías que puedan aparecer a medida que avanza el tiempo, por lo que las herramientas propuestas de la Metodología se pueden actualizar junto a las nuevas técnicas que aparezcan en el mercado.

Por último, si bien la propuesta metodológica de este trabajo corresponde a un primer acercamiento a la forma de instrumentar y monitorear un depósito de relaves abandonado, se considera como el paso inicial para proveer de información a una evaluación para determinar el nivel de estabilidad física de una estructura con estas características y una herramienta que acerque la información relacionada con la estabilidad física de los depósitos de relaves abandonados a las comunidades, quienes son los principales afectados en caso de ocurrencia de accidentes.

9. Recomendaciones

La recomendación principal de este trabajo es la ampliación de la aplicación de esta propuesta a la totalidad de depósitos de relaves abandonados chilenos. Esta Metodología puede ser aplicada por el SERNAGEOMIN, o cualquier otro servicio público o privado, a los 173 depósitos de relaves abandonados en Chile. En la sección 9.1 más adelante se explica la aplicación de la propuesta a todos los depósitos de relaves abandonados en Chile.

9.1. Ampliación de la Propuesta Metodológica a todos los depósitos de relaves abandonados en Chile

En primer lugar, y como sugiere Figueroa (2011), es necesario validar la propuesta. Para esto, se debe crear un comité de profesionales expertos en diferentes materias, tales como: estabilidad física de depósitos de relaves, comportamiento mecánico y dinámico de arenas relaves, geología, sismología, riesgos medioambientales y sociales, entre otros. Este grupo de personas serán los encargados de asignar el valor de los ponderadores de los 9 factores de importancia de esta etapa (Tabla 9.1), determinar la distribución de los tramos de categoría (Figura 4.2) y definir la distribución de puntajes de categorías mostrados en la Tabla 4.1.

Con la validación de ponderadores y la definición de la distribución de categorías, aparece una nueva etapa, llama *Categorización de la Etapa 1 (C-E1)*, ubicada entre la *Etapa 1* y *Etapa 2*, como muestra la Figura 9.1. El rol de esta categorización es dar un orden de importancia a los depósitos, además de discriminar cuales son más urgentes de estudiar y cuantos recursos deben ser asignados.

Para la asignación de ponderadores, Figueroa (2011) integra diferentes variables geofísicas, demográficas y de localización mediante la metodología de Análisis Multicriterio (AMC). En el AMC, el evaluador considera que un criterio es más importante que otro y se expresa en un número usualmente llamado “peso asignado al criterio”.

Los pasos metodológicos se pueden sintetizar como (Figueroa, 2011):

1. Definición de criterios en la evaluación de riesgos: definir los riesgos medioambientales por medio de una búsqueda bibliográfica “para conocer los factores geográficos involucrados” y entrevistas estructuradas a expertos.
2. Ponderación de criterios definidos en el paso 1) por un grupo de expertos quienes asignan “pesos” a los criterios según influencia.

Luego de entrevistarse con 5 expertos, Figueroa obtiene ponderaciones para 11 factores físico-naturales, presentados en la Tabla 9.1. Es importante destacar que algunos de estos criterios se repiten en los aspectos propuestos para la *Etapa 1*, sin embargo, éstos están priorizados para evaluación de riesgos y no para una evaluación de estabilidad física.

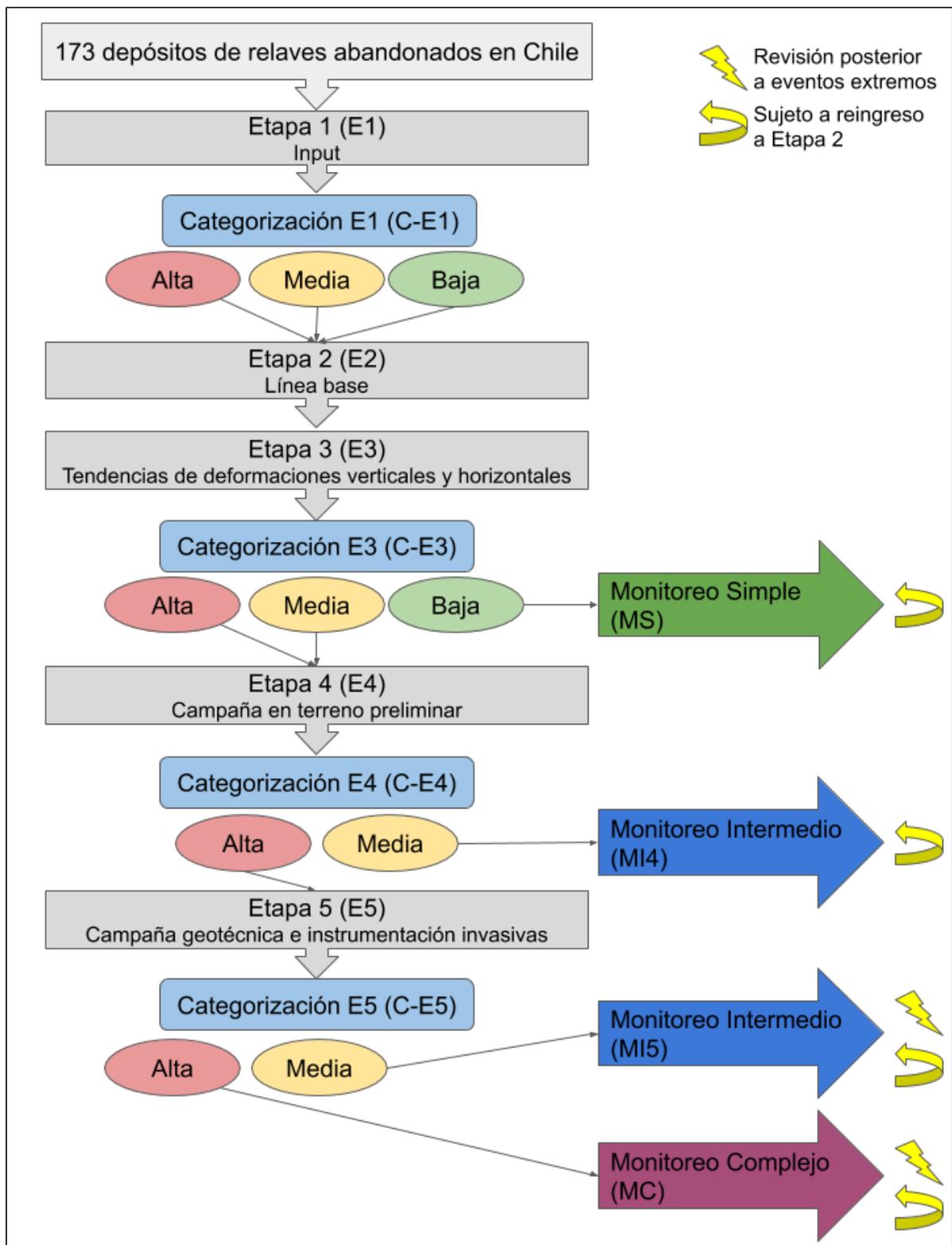


Figura 9.1 Esquema conceptual de Propuesta Metodológica instrumentación y monitoreo para evaluar la estabilidad física de depósitos de relaves abandonados en Chile.

Tabla 9.1 Factores físico-naturales ponderados en Expert Choice (Figueroa, 2011).

	Criterios	Ponderación combinada
1	Distancia a centros poblados	0,243
2	Distancia a aguas superficiales y subterráneas	0,183
3	Distancia a áreas agrícolas y ganaderas	0,128
4	Distancia a áreas silvestres protegidas	0,097
5	Distancia a bosques y/o áreas verdes	0,079
6	Precipitaciones	0,075
7	Tipo de suelo	0,052
8	Distancia a caminos habilitados	0,045
9	Vientos regionales	0,034
10	Valor paisajístico	0,032
11	Sismicidad (falla)	0,031
	Inconsistencia	0,03

Con el puntaje, ponderadores y distribución de categorías, se realiza la *Categorización de la Etapa 1 (C-E1)*, cuyos resultados serán categorías “Alta”, “Media” y “Baja” para cada uno de los 173 depósitos de relaves abandonados en Chile. Los de categoría “Alta” deben ser preferentes para la aplicación de la metodología, ya que representan una combinación de riesgo (vulnerabilidad, amenazas y consecuencias) mayor.

Esta categoría también condiciona de manera directa la distribución de recursos, en términos de calidad y cantidad de información y recursos humanos, que requieren las etapas posteriores.

Cómo está construida la Propuesta Metodológica, los depósitos que en la Etapa 5 se les asigne una categoría “Alta” y, por ende, un *Monitoreo Complejo*, también deben ser los primeros en la eventual aplicación de medidas de remediación. Una vez tratados estos depósitos, siguen los de *Monitoreo Intermedio* de la *Etapa 4* y *Etapa 3*, en ese orden. Finalmente, los depósitos restantes, ubicados en el *Monitoreo Simple*, deben ser los últimos en ser abordados, ya que, por sus condiciones, no representan una amenaza tan importante como los ya tratados.

9.2. Otras recomendaciones

A continuación, se mencionan algunas recomendaciones para trabajos futuros.

- Se recomienda un continuo mejoramiento y adaptación de la Propuesta Metodológica, considerando la variabilidad en la tipología de los depósitos de relaves abandonados, su ubicación geográfica, condiciones ambientales y, en general, todos los parámetros a monitorear.
- Como se menciona previamente, es necesario la validación de la metodología con expertos. Esto se puede lograr mediante la aplicación a depósitos que ya hayan fallado, similar a la aplicación de ingeniería forense.
- Caracterización de las propiedades y parámetros geotécnicos de los relaves almacenados en los depósitos de relaves abandonados chilenos. Además, generar correlaciones para las investigaciones recomendadas en este trabajo (como el DCP y ensayos triaxiales, por mencionar algunos).
- La acumulación de información no tiene sentido si no se le asigna un uso. Se sugiere la creación de una base de datos manejada por el SERNAGEOMIN donde se publiquen las líneas de base de los depósitos, los estudios aplicados y las condiciones de estabilidad por cada mecanismo de falla.
- Involucrar a las comunidades en el monitoreo activo de los depósitos abandonados. Es necesario educar a la población residente cercana a los depósitos sobre el impacto socioambiental que provocan estas construcciones fuera de norma.

10. Glosario de siglas

- ANCOLD: Australian National Committee On Large Dams/Comité Nacional Australiano de Grandes Presas
- ICOLD: International Commission on Large Dams
- USSD: United States Society on Dams
- CDA: Canadian Dam Association
- MAC: The Mining Association of Canada
- SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile
- DGA: Dirección General de Aguas, Chile
- USCOLD: United States Committee on Large Dams
- CODELCO: Corporación Nacional del Cobre, Chile
- MINEM: Ministerio de Energía y Minas, Perú
- DMP: Department of Mines and Petroleum, Australia
- EPA: United States Environmental Protection Agency
- MSHA: Mine Safety and Health Administration
- FEMA: Federal Emergency Management Agency, Estados Unidos
- ICCM: International Council on Mining and Metals
- IDE: Infraestructura de Datos Geospaciales de Chile
- GIS: Geographic Information Systems. En español SIG, de Sistema de Información geográfica.
- DEM: Digital Elevation Model. En español MDE, de Modelo Digital de Elevación.
- NOAMI: National Orphaned/Abandoned Mines Initiative.
- E1: Etapa 1 – Input
- E2: Etapa 2 – Línea de base
- E3: Etapa 3 – Tendencias de deformaciones verticales y horizontales
- E4: Etapa 4 – Campaña en terreno preliminar
- E5: Etapa 5 – Campaña geotécnica invasiva e instrumentación invasiva
- MS: Monitoreo Simple
- MI4: Monitoreo Intermedio post Etapa 4
- MI5: Monitoreo Intermedio post Etapa 5
- MC: Monitoreo Complejo

11. Bibliografía

- Ahmari, S., Zhang, L. (2012). Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization *Construction and building materials*, 29, 323-331.
- Albers, C. (2018). Coberturas de uso libre para Sistemas de Información Geográficas. Recuperado de: <<http://labgeo.ufro.cl/catalogos/chile.html>> Consultado el: 4 de enero de 2019.
- ANCOLD (1999). Guidelines on tailings dam design, construction and operation. Australian National Committee on Large Dam, 55p.
- ANCOLD (2012). GUIDELINES ON TAILINGS DAMS – PLANNING, DESIGN, CONSTRUCTION, OPERATION AND CLOSURE. Recuperado de: <<https://www.ancold.org.au/?product=guidelines-on-tailings-dams-planning-design-construction-operation-and-closure-may-2012>> Consultado el: 17 de abril de 2019.
- ArcGIS (2017). Modelos digitales de elevación. Recuperado de: <<https://learn.arcgis.com/es/related-concepts/digital-elevation-models.htm>>. Consultado el: 11 de septiembre de 2019.
- Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Centro de Investigación Y Desarrollo En Información Geográfica Del IGAC-CIAF, 46.
- ASTM D2487-17 (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.
- Azam, S., Li, Q. (2010). Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotechnical News*, 28(4), 50-54.
- Barrera, S., Valenzuela, L., Campaña, J. (2011). Sand tailings dams: design, construction and operation. In *Proceedings of Tailings and Mine Waste 2011*, Vancouver, B.C.
- BBC News. Vale 'knew collapsed dam was at risk', says report. BBC. [en línea]. 12 de febrero de 2019. Recuperado en: <<https://www.bbc.com/news/business-47209265>>. Consultado el: 17 de abril de 2019.
- Bian, Z., Miao, X., Lei, S., Chen, S. E., Wang, W., Struthers, S. (2012). The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes. *Science*, 337(6095), 702-703.
- Bürgmann, R., Rosen, P. A., Fielding, E. J. (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual review of earth and planetary sciences*, 28(1), 169-209.

- Burnham, T., Johnson, D. (1993). In Situ Foundation Characterization Using the DCP. Mn/DOT Publication 93-05.
- Canadian Dam Association. (2007) Dam Safety Guidelines.
- Carvajal, M. (2018). Desarrollo de una metodología para análisis de estabilidad física de depósitos de relaves. Tesis (Ingeniería Civil). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Castillo, J. (2016). Informe final: Conceptualización Proyecto DESARROLLO DE HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PARA EL MONITOREO DE DEPÓSITOS DE RELAVES. 93p. Recuperado de: <<https://docplayer.es/22923718-Informe-final-conceptualizacion-proyecto-desarrollo-de-herramientas-tecnologicas-para-el-monitoreo.html>>. Visitado el: 8 de julio de 2019.
- Corral, G. (2008) Efecto del esfuerzo de corte estático inicial en la resistencia cíclica en arenas. Tesis (Magíster en ciencias de la ingeniería mención ingeniería geotécnica). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Correia, N. A. (2015). Obtención del perfil de velocidad de onda de corte mediante método MASW y comparación con ensayo tipo downhole en estaciones sismológicas de zona central. Tesis (Ingeniería Civil). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- CSN (2014). Sismicidad y Terremotos en Chile. Centro Sismológico Nacional. Universidad de Chile. Recuperado de: <http://www.csn.uchile.cl/wp-content/uploads/2014/06/001_terremotos_y_sismicidad_chile.pdf>. Consultado el: 14 de julio de 2019
- DGA (1995). Manual de Cálculos de Crecidas y Caudales Mínimos En Cuencas Sin Información Fluviométrica. DGA: Santiago, Chile.
- Davies, M. (2002). Tailings Impoundment Failures: Are Geotechnical Engineers Listening?. Waste Geotechnics. 20. 1-36.
- Department of Minerals and Energy (1999). Guidelines on the Safe Design and Operating Standards for Tailings Storage.
- Department of Mines and Petroleum (2013). Tailings storage facilities in Western Australia – code of practice: Resources Safety and Environment Divisions, Department of Mines and Petroleum, Western Australia, 13 pp.
- Dobry, R. y Álvarez, L. (1967). Seismic failures of Chilean tailings dams. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.

- Duro, J., Granda, J., Iglesias, R., Garcia, E., Ruiz, G., Albiol, D., Centolanza, G., Vicente, F. y Yam, L. Tailings dam monitoring with remote sensing radar satellites. 5th International Seminar on Tailings Management.
- Eisenhammer, S. (2019) EXCLUSIVA-La brasileña Vale sabía que había mayor riesgo de ruptura en la presa Brumadinho. [en línea]. Belo Horizonte, Brasil. 12 de febrero de 2019. Recuperado en: <<https://es.reuters.com/article/idESKCN1Q10KV-OESTP>> Consultado el: 17 de abril de 2019.
- El Rancagüino (2018). El Teniente produce el 27 por ciento de cobre de Codelco. Diario El Rancagüino. [en línea]. 28 de abril de 2018. Recuperado de: <<https://www.elrancaguino.cl/2018/04/28/el-teniente-produce-el-27-por-ciento-de-cobre-de-codelco/>>. Consultado el: 13 de julio de 2019.
- Escobar, C. y Duque, G. (2016). Geotecnia para el trópico andino. N/A, Manizales, Colombia. (No publicado). Recuperado de: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/53560/>>
- Espinace, R., Villavicencio, G. y Lemus, L. (2013). The PANDA Technology applied to design and operation of tailings dams. 10.13140/2.1.4228.2568.
- ESRI. (2018a). Generar tabla de Cercanía. ArcGIS Desktop. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.5/tools/analysis-toolbox/generate-near-table.htm>
- ESRI. (2018b). Qué es ArcMap. ArcGIS Desktop. Recuperado de: <<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.5/map/main/what-is-arcmap-.htm>>
- European Commission. (2004). Reference document on best available techniques for management of tailings and waste-rock in mining activities.
- Figueroa, M. (2011). Evaluación preliminar de riesgos medioambientales de faenas abandonadas/paralizadas mediante SIG en la II Región de Antofagasta, Chile. Tesis (Geógrafa). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Escuela de Geografía.
- Foster, S M. (1999) A technical framework for mine closure planning: a technical review. United Kingdom: N. p., 1999. Web.
- Fundación Chile. (2017). Informe de Hito Crítico: Respuesta a Observaciones de Adjudicación. Revisión 0.
- Fundación Chile (2018a). Actividad 01: Estado del arte referente a la estabilidad física de los depósitos de relave. Revisión B. Fundación Chile. 122p.
- Fundación Chile (2018b). Avances y retos para la gestión de los depósitos de relaves en Chile. Santiago, Chile.

- Fundão Tailings Dam Review Panel (2015). The Fundão Tailings Dam Investigation. [en línea]. Recuperado en: <<http://fundaoinvestigation.com/>>. Consultado el: 16 de abril de 2019.
- Gesche, R. (2017). Definición de instrumentación y monitoreo geotécnico. [Material de clase] Instrumentacion en Ingenieria Geotecnica y Estructural, Universidad de Chile, Santiago. 30 de agosto de 2015.
- González-Vallejos, L. et. al. (2002). Ingeniera Geológica. Editorial PEARSON EDUCACIÓN. Madrid. 744p.
- Google Earth Pro. [consulta: 31 de julio de 2019]
- Humire, F., Sáez, E., Leyton, F. (2015). Manual de aplicación de técnicas geofísicas basadas en ondas de superficie para la determinación del parámetro Vs30. Instituto de la Construcción. 31 de marzo de 2015. Recuperado de: <http://www.iconstruccion.cl/documentos_sitio/19049_manual.pdf>. Consultado el: 30 de mayo de 2019.
- ICMM (2016). Review of tailings management – Guidelines and recommendations for improvement. United Kingdom.
- Infraestructura de datos geoespaciales (2019). Gobierno de Chile. Recuperado de: <<http://www.ide.cl/descarga/capas.html>> Accedido el: 4 de enero de 2019.
- INN. NCh 1117 (2010). Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas.
- INN. NCh 1508 (2008). Geotecnia – Estudios de mecánica de suelos.
- INN. NCh 1517/1 (1999). Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 1: Determinación del límite líquido
- INN. NCh 1517/2 (1999). Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 2: Determinación del límite plástico
- INN. NCh 1532 (1980). Mecánica de suelos – Determinación de la densidad de partículas sólidas
- INN. NCh 1886. Clasificación de suelos para obras de ingeniería.
- INN. NCh 433. Of 96 (2009). Diseño sísmico de edificios.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (2001). Tailings dams: risk of dangerous occurrences: lessons learnt from practical experiences (Vol. 121). United Nations Publications.

- Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macklin, M. G., y Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229-245.
- Lopes, N. P., Freitas, R. P. D., y Rocha Filho, R. C. (2019). How Many More Brumadinhos and Marianas Will We be Faced with Yet?. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 30(4), 681-682.
- Manual de Carreteras. Volumen N°3 Instrucciones y Criterio de Diseño. Capítulo 3.700 Diseño del drenaje, saneamiento mecánica e hidráulica fluvial. Santiago, Chile. (2019)
- Mardones, M. y Vidal, C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. *EURE (Santiago)*. ISSN 0250-716.
- Martin, T. E., Davies, M. P., Rice, S., Higgs, T., y Lighthall, P. C. (2002). Stewardship of tailings facilities.
- Mining Association of Canada (MAC) (1998). A Guide to the Management of Tailings Facilities. Mine Association of Canada.
- Mining Association of Canada (MAC) (2011). Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities
- Ministerio de Energía y Minas (1998). Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina. Lima, Perú.
- Ministerio de Energía y Minas (2006). Guía para la elaboración de planes de cierre de minas. Lima, Perú, abril de 2006.
- Ministerio de Energía y Minas (2014). Reglamento de Protección y Gestión Ambiental para las Actividades de Explotación, Beneficio, Labor General, Transporte y Almacenamiento Minero. DS N°40-2014-EM. Lima, Perú, 12-nov-2014. Recuperado de: <http://sinia.minam.gob.pe/normas/reglamento-proteccion-gestion-ambiental-las-actividades-explotacion>
- Ministerio de Energía y Minas. (2015) Reglamento para el Cierre de Minas. DS N°33-2005-EM. Lima, Perú, 15-ago-2015. Recuperado de: <http://www.mineriartesanalperu.pe/comerciojusto/Ley%20que%20regula%20el%20cierre%20de%20minas.pdf>
- Ministerio de Minería de Chile (1970). Decreto Supremo N° 86. Reglamento de construcción y operación de tranques de relave.

- 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.
- Ministerio de Minería de Chile (2019). Política Nacional de Relaves. CESCO Week Stgo 2019. Santiago de Chile, 8 de abril, 2019.
- Mitchell, G., Turner, J. y Engels J. (2018). Advances in tailings surveying using optical satellites. 5th International Seminar on Tailings Management.
- Mohammadi, S.D., Nikoudel, M.R., Rahimi, H. y Khomehchiyan, M. (2008). Application of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for determination of the engineering parameters of sandy soils. *Engineering Geology*, Volume 101, Issues 3–4, 2008, Pages 195-203. ISSN 0013-7952. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.05.006>.
- Mine Safety and Health Administration (2010). *Engineering and Design Manual - Coal Refuse Disposal Facilities*.
- Muñoz, E. (2013) Susceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en zonas urbanas. Estudio de caso en Viña del Mar, V Región. Tesis (Magíster en Ciencias, Mención Geología). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- National Orphaned/Abandoned Mines Initiative (NOAMI). Recuperado en: <https://www.abandoned-mines.org/en/>. Consultado el: 5 de agosto de 2019.
- Núñez, J. (2019). Propuesta metodológica para la medición de volúmenes en obras civiles mediante el uso de fotogrametría. Tesis (Ingeniería Civil). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Peña, G., Comte, D., Pasten, C., Salomón, J. y Sáez, M. (2018). Ambient Noise Tomography Applied to Abandon Tailing Dam: Results From a Very Short Experiment. En: American Geophysical Union, Fall Meeting 2018 (Washington DC, Estados Unidos). 10 a 14 de diciembre de 2018. Washington DC, Northwest, Walter E. Washington Convention Center.
- Ramírez, N. (2007) Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. Chile, SERNAGEOMIN.
- Reigber, A., Erten, E., Guillaso, S. y Hellwich, O. (2007). I.D.I.O.T.: A Free and Easy-to-use Software Tool for DInSAR Analysis.
- Resende, L., Oliveira Filho, W. y Nogueira, C. (2013). Use of the DCP test for compaction control of staged dikes in mining tailings dams. *Rem: Revista Escola de Minas*, 66(4), 493-498. <https://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672013000400014>

- Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A. R., Díez-Herrero, A., y Pereira, H. G. (2008). Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of hazardous materials*, 152(2), 846-852.
- Roa, J. y Kamp, U. (2008). Digital Elevation Models (DEM) from spaceborne systems. An introduction and comparative analyses in the cordillera of Mérida-Venezuela. 49. 11-42.
- Romero, A., y Flores, S. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Industrial data*, 13(2), 75-82.
- Sáez, M. (2016). Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de Santiago. Tesis (Ingeniería Civil y Magister en Ingeniería Sísmica). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Sánchez, C., Manso, A. y Verdugo, M. A. (2018) Application of Differential Interferometric Radar Satellite Methodology (DInSAR) to Detect Ground Motion on Codelco Chuquicamata's Talabre Tailings Dam. 5th International Seminar on Tailings Management.
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2002). Guía Metodológica para el Cierre de Faenas Mineras.
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2015). Preguntas Frecuentes sobre Relaves.
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2018a). Análisis de los Depósitos de Relaves en Chile.
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2018b). Guía Metodológica para Evaluación de Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2018c). Estudios de normativas internacionales de diseño, construcción, operación, cierre y post cierre de depósitos de relaves. Junio 2018.
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2019a). Catastro Depósitos de Relaves en Chile.
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2019b). Red Nacional de Vigilancia Volcánica. Providencia, Chile.
- Sillerico, E., Marchamalo, M., Rejas, J. G. y Martínez, R. (2010). La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción. *Informes de la Construcción*. 62. 10.3989/ic.09.063.

- Suárez, J. (2009). "Deslizamientos: Análisis Geotécnico". Universidad Industrial de Santander. UIS Facultad de Ingenierías Físico Mecánica Escuela de Ingeniería Civil, Volumen 1, Colombia.
- Toland, G. C. (1977, April). Case history of failure and reconstruction of the mike horse tailings dam near Lincoln, Montana. In 15th Annual Engineering Geology and Soils Engineering Symposium, Idaho Transportation Department, University of Idaho, MoscowIdaho State University, PocatelloBoise State University.
- Toro, D. (2017) Propuesta para la regulación jurídica de pasivos ambientales mineros: Casos de relaves de Chañaral y Andacollo. Tesis (Magíster en Derecho Ambiental). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Derecho, Escuela de Postgrado.
- Torres, P. (2009). Ensayo de Permeabilidad Lefranc. Geología y Geotécnica. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura UNR. Rosario, Argentina. Recuperado de:
<<https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Ensayo%20de%20Permeabilidad%20Lefranc%202009.pdf>>. Visitado el: 4 de julio el 2019.
- Tremblay, G. A. y Hogan, C. (2016). Managing Orphaned and Abandoned Mines – A Canadian Perspective. En: DEALING WITH Derelict Mines Summit: 4 a 6 de diciembre de 2016. Singleton, NSW, Australia. 25 p.
- Troncoso T., J. (1990). Failure risks of abandoned tailings dams. International Symposium on Safety and Rehabilitation of Tailing Dams (International Commission on Large Dams). Australian National Committee on Large Dams, Sydney, Australia, 23 de mayo, 1990.
- Troncoso, J., Ishihara, K., & Verdugo, R. (1988). Aging effects on cyclic shear strength of tailings materials. In Proc., Ninth World Conference on Earthquake Engineering (Vol. 3, pp. 2-9).
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1994) Technical report - Design and evaluation of tailings dams. (EPA 530-R-94-038). Office of Solid Waste - Special Waste Branch. Washington, DC 20469, Estados Unidos. 63p.
- Ubilla, J. (2015). Conceptos básicos de manejo de relaves. Universidad de Chile. 19 de marzo, 2015.
- Urbano, S. (2018). Entrevista de investigación para optar al título de Ingeniería Civil en SERNAGEOMIN. 23 de octubre de 2018.
- Valdebenito, L. (2015) Estimación de Costos de Cierre de Pasivos Ambientales Mineros identificados en Chile de acuerdo a los requerimientos de la Ley 20.551. Tesis (Magíster en Gestión y Planificación Ambiental). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza.

- Vale S.A. Vale updates information on the dam breach in Brumadinho. [en línea]. Rio de Janeiro, Brasil. 27 de enero de 2019. Recuperado en: <<http://www.vale.com/EN/investors/information-market/Press-Releases/Pages/Vale-updates-information-on-the-dam-breach-in-Brumadinho.aspx>>.
- Vila, F. (2019). Entrevista de investigación para optar al título de Ingeniería Civil en SERNAGEOMIN. 27 de junio de 2019.
- Villavicencio, G., Espinace, R., Palma, J., Fourie, A., & Valenzuela, P. (2013). Failures of sand tailings dams in a highly seismic country. *Canadian geotechnical journal*, 51(4), 449-464.

Anexo A: Accidentes de depósitos de relaves abandonados reportados a nivel mundial

Identificación según ICOLD (2001)	Nombre mina o depósito	Ubicación	Mineral /relave	Altura [m]; Método constructivo; Material retenido; Volumen depósito [m3]	Información del incidente Fecha; Tipo; Causa	Cantidad de relave liberado [m3]	Distancia recorrida por relave [m]	Descripción del incidente	Fuente
N° 16	Blackbird	Idaho, Estados Unidos	Cobalto	15;CL;1,230,000	-;2B;ST			El embalse se construyó en los años 1940 y 1950 con una alcantarilla de metal para pasar flujos de corrientes perennes debajo de la presa y el embalse. La alcantarilla se corrió bajo la influencia de efluentes de relaves ácidos, y al menos parcialmente colapsó. No se produjo una brecha en el terraplén, pero los relaves suspendidos se descargaron al drenaje aguas abajo durante los períodos de alto flujo a través de la alcantarilla dañada.	[1]
N° 38	Derbyshire	Reino Unido	Carbón	8; DC	1966;1B;FN	30,000	100	El embalse había estado inactivo durante 8 años en el momento de la falla. Los materiales de la fundación consistían en 20 pies de arcilla sobre lecho de roca de esquisto / lodo. La falla por deslizamiento de la cimentación se atribuyó a las presiones de los poros de la cimentación artesanal producidas por la infiltración de embalses activos adyacentes y recarga natural, con el hundimiento de trabajos subterráneos como una posible causa contribuyente.	[1]
N° 39	Dixie Mine	Colorado, Estados Unidos	Oro		1/4/1961; 1B; U			Sin detalles.	[1]
N° 50	Golden Gilpin Mine	Colorado, Estados Unidos	Oro	12	1/11/1974; 1B; U			Sin detalles.	[1]
N° 56	Hirayama	Japón	Oro	9; DS; 87,000	1978; 2B; EQ			La represa experimentó aceleraciones estimadas en 0.2-0.35 g por el terremoto M7.0 Izu-Oshima-Kinkai. El embalse había estado inactivo durante unos 20 años. La presa experimentó grietas y los relaves exhibieron volcanes de arena, pero no se produjo ninguna falla.	[1]
N° 65	Keystone Mine	Crested Butte, Colorado, Estados Unidos	Molibdeno		1/5/1975; 1B; U			Sin detalles.	[1]
N° 143	S/I	Reino Unido	Carbón	DS	-;2B; SI			El deslizamiento del talud aguas arriba de la presa ocurrió durante la excavación de los relaves confiscados a una profundidad de 40 pies destinada a permitir la reutilización del embalse. La falla se atribuyó a las condiciones de extracción rápida en la pendiente ascendente después de la eliminación de los relaves.	[1]
N° 188	Mineral King	British Columbia, Canadá		6; CL; CST; Pequeño	20/3/1986; 1B; OT			Ruptura del depósito por overtopping. Zanja de desviación bloqueada por hielo durante el inicio del derretimiento de nieve en primavera	[1]

Identificación según ICOLD (2001)	Nombre mina o depósito	Ubicación	Mineral /relave	Altura [m]; Método constructivo; Material retenido; Volumen depósito [m3]	Información del incidente Fecha; Tipo; Causa	Cantidad de relave liberado [m3]	Distancia recorrida por relave [m]	Descripción del incidente	Fuente
N° 190	Rossarden	Tasmania		7,5;WR;E; 200,000	16/5/1986; 1B; OT			Presa construida en 1931 en un lado del valle a 190 m sobre el río, de capas de tierra y esteras de árboles de té, de manera no controlada. El agua irrumpió en el lado principal del área del embalse, barrió el embalse y superó la presa delantera causando fallas. El río se contaminó.	[1]
N° 191	Story's Creek	Tasmania		17; ; Valley side; 30,000	16/5/1986; 1B; OT	Mínima		Presa construida en 1931 de manera descontrolada, principalmente de relaves, con un ancho de coronamiento de 1 m y una pendiente aguas abajo de 1:1. Rebalse en la inundación máxima de 1 en 100 años. La presa falló, el aliviadero cambió; limos liberados; tubería colapsó causando contaminación del agua.	[1]
N° 198	Kojkovac	Montenegro	Plomo/ Zinc	; WR; E; 3,500,000	11/1992; 2B; ER	Ninguna		Presa de tierra con revestimiento de plástico construido alrededor de 1970 junto al río Tara. El pie del talud es erosionado por el río desbordado, causó deslizamientos que redujeron a la mitad el espesor del coronamiento, pero no overtopping. Río desviado y pie del talud protegido por gaviones en el marco del proyecto de emergencia de la ONU para prevenir la contaminación que hubiera afectado al Danubio.	[1]
N° 202	Merriespruit	Virginia, Sudáfrica	Oro	31; US Paddock; T; 10Mt	22/2/1994; 1B; OT	2,5Mt	2,000	Cerrado por muestra de signos de inestabilidad en la parte más cercana al pueblo. La minera continúa su uso para contener agua. Esto reduce la revancha y la laguna de decantación. Lluvia intensa causa rebalse durante la tarde. Personal de la mina intenta liberar agua y advertir a la población. Alto nivel freático causa falla del depósito adyacente a casas. 17 muertos	[1]
N° 206	Placer Bay	Surigao del Norte, Filipinas		17; WR; E	2/9/1995; 1B; SI	50,000	Hasta el mar	Embalse inactivo. Desechos de roca se colocan en la parte superior de los relaves para su almacenamiento cuando la presa falla hasta el mar y forma una brecha de 100 m. 12 muertos, incluido el inspector de seguridad, y 14 piezas de equipo pesado que habían estado trabajando para colocar el desecho de roca en el depósito.	[1]
N° 79	Mike Horse	Montana, Estados Unidos	Plomo/ zinc	18; US ; T; 750,000	1975; 1B; OT	150,000		Durante una escorrentía extrema de un evento de lluvia sobre nieve, los taludes de una zanja de desviación se saturaron y fallaron, dirigiendo el flujo de la corriente desviada hacia el depósito abandonado. La capacidad de decantación fue insuficiente para descargar el flujo, y el depósito colapsó por overtopping.	[2] [3]
N° 42	El Cerrado	Chile	Cobre	15; US; T	28/3/1965; 2B; EQ			El depósito, de 3 niveles, llevaba 10 años de abandono para el terremoto M 7,4 de La Ligua. Los taludes tenían pendientes de 1,4:1. El terremoto produjo grietas de hasta 6 pies de profundidad por todo el coronamiento acompañado por varias fallas circulares, especialmente en las esquinas del depósito. Se registraron deformaciones de hasta 1 pie en el coronamiento.	[2]

Identificación según ICOLD (2001)	Nombre mina o depósito	Ubicación	Mineral /relave	Altura [m]; Método constructivo; Material retenido; Volumen depósito [m3]	Información del incidente Fecha; Tipo; Causa	Cantidad de relave liberado [m3]	Distancia recorrida por relave [m]	Descripción del incidente	Fuente
N° 46	El Cobre 4	Nogales, V Región, Valparaíso, Chile	Cobre	26; US; T; 985,000	28/3/1965; 2B; EQ (SI+SID)			El Tranque Chico colindaba con Tranque Nuevo y Tranque Viejo, ambos fallaron durante el terremoto M 7,4 de La Ligua. Los Tranques Chico y Viejo eran similares en construcción (pendientes empinadas 1,2:1), pero estaba abandonado en el momento del terremoto, con una corteza superficial disecada de 5 metros de profundidad. Fueron reportados daños en forma de deslizamientos superficiales, pero el tranque se mantuvo esencialmente intacto.	[2]
N° 90	Norosawa	Japón	Oro	24; DS; ; 225,000	14/1/1978; 2B; EQ			El depósito llevaba abandonado 13 años para el terremoto M 7,0 de Izu-Oshima-Kinkai. Aparecieron volcanes de arena en la superficie de las lamas almacenadas y grietas en el muro, pero no ocurrió falla.	[4]
N° 76	Marga	Sewell, VI Región, Rancagua, Chile	Cobre		1985; 1B; OT			El depósito abandonado transversal al valle tenía una estructura de decantación, pero no un sistema de drenaje. Ocurrió una falla por overtopping debido a la capacidad de decantación insuficiente para enrutar los flujos a través del depósito.	[1]
N° 151	S/I	Indiana, Estados Unidos	Carbón		-; 1B; OT			Un depósito de relaves de carbón abandonado presentó fallas por overtopping durante fuertes lluvias. No hay más detalles disponibles.	[6]
N° 175	Vallenar 1 y 2	Vallenar, IV Región, Vallenar, Chile	Cobre		1983; 1B; OT			Dos depósitos abandonados construidos en serie a través de un valle incorporaban solamente estructuras de decantación, sin sistema de drenaje. Una falla por overtopping en el depósito superior provoca una falla en el depósito inferior.	[5] [1]
N° 27	Cerro Negro 1	Cabildo, V Región, Valparaíso	Cobre	46; US; T	28/3/1965; SI+SID/EQ			Depósito inactivo para el terremoto Ms 7,4 de La Ligua y adyacente al depósito N° 3 que falló. Experimentó grietas, especialmente en el coronamiento, y algunos pequeños deslizamientos. Pendiente muro: 1,2:1 a 1:1.	[1] [7]
N° 28	Cerro Negro 2	Cabildo, V Región, Valparaíso	Cobre	46; US; T	28/3/1965; SI+SID/EQ		116	Depósito inactivo para el terremoto Ms 7,4 de La Ligua y adyacente al depósito N° 3 que falló. Pendientes tan empinadas como 1:1. Experimento grietas en el coronamiento y pequeños deslizamientos.	[7] [1]
N° 70	Los Maquis No. 1	Cabildo, V Región, Valparaíso	Cobre	15; US; T	28/3/1965; 2B; SI+SID/EQ	23,000	40,000	Depósito experimenta movimiento fuerte por el terremoto Ms 7,4 de La Ligua. Estaba adyacente al depósito activo Los Maquis No. 3 que falló. El depósito No. 1 estaba fuera de servicio hace muchos años, y solo experimento pequeñas grietas por el coronamiento y pequeños deslizamientos de relaves. Pendiente muro: 1,7:1.	[7] [1]
N° 107	El Sauce 4	Llay Llay, V Región, Valparaíso	Cobre	5; US; T	28/3/1965; 2B; SI+SID/EQ			Depósito inactivo para el terremoto Ms 7,4 de La Ligua. Sufrió agrietamiento menor.	[7] [1]
	Ramayana	V Región, Valparaíso		5; US	28/3/1965; LQ+FF	156		Pendiente muro: 1,5:1. Causado por el terremoto Ms 7,4 de La Ligua	[7]
	Arena	Rancagua, Chile			-; OT+FF			Fuertes lluvias y overtopping.	[7]

Identificación según ICOLD (2001)	Nombre mina o depósito	Ubicación	Mineral /relave	Altura [m]; Método constructivo; Material retenido; Volumen depósito [m3]	Información del incidente Fecha; Tipo; Causa	Cantidad de relave liberado [m3]	Distancia recorrida por relave [m]	Descripción del incidente	Fuente
	Maitén	IV Región, Región		15; US	14/10/1997; -;LQ+FF			Pendiente muro: 1,5:1. Causado por el terremoto Ms 7,0	[7]
	Las Palmas	Pencahue, VII Región, Maule, Chile		15	27/02/2010; LQ+FF	80% del volumen total	500	Causado por el terremoto Mw=8.8. Distancia epicentral: 133 km. No operativo desde 1997, cubierto por una capa de material arcilloso. Licuación sísmica a nivel basal del dique de retención y la base del relave debido a saturación (0,5 a 1 m) generado por filtraciones no detectadas, que probablemente surgieron luego del cierre. Muerte de 4 personas que habitaban cerca del depósito. Obstrucción de los cursos de Los Ladrones y Las Palmas. Dispersión de relaves en tierras privadas.	[7]
	Tranque Planta Chacón	Cachapoal, VI Región, Rancagua, Chile			27/02/2010; SI+SID			Pendiente muro: 1,8:1. Causado por el terremoto Mw=8.8	[7]
	Veta del Agua Tranque 5	Nogales, V Región, Valparaíso, Chile		; US	27/02/2010; SI+SID	80,000	100	Pendiente muro: 1,4:1. Causado por el terremoto Mw=8.8. Distancia epicentral: 400 km. Fuera de operación desde 1998. Colapso producido por la obstrucción de una quebrada adyacente y paralela al depósito por un largo de 100 m. Compactación insuficiente del dique de retención	[7]
	Tranque 1 (Minera Clarita)	San Felipe, V Región, Valparaíso Chile		; US	27/02/2010; SI+SID	80% del volumen total		Causado por el terremoto Mw=8.8. En funcionamiento hasta 2009, posteriormente se detuvo indefinidamente. Compactación insuficiente del dique de retención; ángulo de aguas abajo > 1,2:1. El colapso provocó que un gran volumen de relaves descendiera, inundando el Tranque No. 2 fuera de servicio; Inestabilidad de taludes con deformaciones inducidas sísmicamente.	[7]
	Tranque Antigo (Planta La Cocinera)	Vallenar, IV Región, Vallenar, Chile		30; US	14/10/1997; LQ+FF	60,000	150	Pendiente de muro: 1,7:1. Sismo interplaca Ms=7,0, R=120 km, Profundidad: 33km. Construcción mediante combinación de eje central y aguas arriba, sin compactación mecánica, con una altura de 30 m. El terremoto ocurrió después de un episodio lluvias extremas, propiciando un episodio de licuación. Acorde a registros, el depósito había sido afectado significativamente por terremotos en años anteriores.	[7]

Fuentes: [1] ICOLD, 2001. [2] Dobry y Álvarez, 1967. [3] Toland, 1977. [4] Okusa et al, 1980. [5] Troncoso, 1990. [6] Wobber et al, 1974. [7] Villavicencio et al., 2014. Pendientes H: V.

Tipo: US: aguas arriba, DS: aguas abajo. Material retenido: T: relave. Tipo de incidente: 1B: falla, deposito inactivo. 2B: accidente, deposito inactivo. Causa del incidente: LQ+FF: Licuefacción con falla de flujo. SI+SID: Inestabilidad de taludes con deformaciones sísmicas inducidas. OT: overtopping. EQ: terremoto.

Anexo B: Catastro de Depósitos de Relaves Abandonados en Chile

En verde se destacan los 11 depósitos identificados por el SERNAGEOMIN, SEA y Ministerio de Minería como parte de las 27 faenas que “generan riesgos físicos y químicos (Ministerio de Minería, 2019).

El contenido de las columnas se describe a continuación:

- ID: número de identificación asignado para este trabajo
- ID SERNAGEOMIN: número de identificación asignado por SERNAGEOMIN obtenido del Catastro SERNAGEOMIN
- Región: número de región de Chile donde se ubica el depósito. Obtenido del Catastro SERNAGEOMIN
- Instalación: nombre de la instalación. obtenido del Catastro SERNAGEOMIN
- Cuenca hidrográfica: cuenca hidrográfica donde se encuentra el depósito. Obtenido por ArcMap mediante las capas obtenidas de Albers (2012)
- Unidad morfológica: unidad morfológica donde se encuentra el depósito. Obtenido por ArcMap mediante las capas de Albers (2012)
- Área: área aparente que cubre el depósito. Obtenido mediante “Área” de ArcMap
- Grupo: ubicación del depósito en grupos cercanos. Se anota el número asignado al grupo. En caso de tener una celda vacía, no existen depósitos cercanos.
- Muro: presencia de un muro de arenas claro. Se marca “si” en caso de presentarlo. De lo contrario, la celda se deja vacía.
- Derrame: presencia de un derrame claro. Se marca “si” en caso de presentarlo. De lo contrario, la celda se deja vacía.
- Altura inferida: cociente entre el volumen, autorizado o real, y área.
- Distancia a población: distancia a lugares habitados. Obtenido por ArcMap mediante las capas de Albers (2012) e IDE (2019)
- Distancia a cuerpos de agua: distancia a ríos, esteros y lagos. Obtenido por ArcMap mediante las capas de Albers (2012) e IDE (2019)
- Distancia a ZOIT: distancia a zonas de interés turístico. Obtenido por ArcMap mediante las capas de Albers (2012) e IDE (2019)
- Distancia a volcanes: distancia a volcanes. Obtenido por ArcMap mediante las capas de Albers (2012) e IDE (2019)

ID	ID SRGM	Región	Instalación	Cuenca Hidrológica	Unidad Morfológica	Área [Há]	Grupo	Muro	Derriame	Altura Inferida [m]	Dist. Pobl. [m]	Dist. Agua [m]	Dist. ZOIT [m]	Dist. Volcanes [m]
1	635	IV	Delirio 1	Rio Limarí	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	5,04	10			11,9	1.167	343	1.064	102.583
2	659	II	Relave Caracoles 1-2	Quebrada Caracoles	Llanos Del Desierto	6,64				6,0	62.135	45.419	2.922	165.208
3	1083	V	Cobre Oxidado 1-5	Rio Aconcagua	Cordones Transversales	0,02				1.959,3	1.850	2.088	3.979	109.245
4	171	V	La Paciencia	Rio Aconcagua	Cuencas Transicionales Semiáridas	8,79				3,6	2.113	157	2.273	190.134
5	636	IV	Delirio 3	Rio Limarí	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	4,43	10			6,3	1.062	259	1.080	347.832
6	1068	IV	Desconocido	Rio Limarí	Cordones Transversales	5,09				5,3	3.609	2.768	3.978	368.979
7	578	IV	Llamuco	Rio Choapa	Cordones Transversales	5,97	21	Si		4,1	7.071	677	6.489	340.188
8	581	IV	El Durazno	Rio Choapa	Cordones Transversales	5,95				4,1	4.176	3.222	9.435	248.426
9	511	III	Las Bombas 1	Costeras Quebrada Pan De Azúcar - Rio Salado	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	1,26				18,2	37.673	36.352	6.674	369.387
10	967	IV	Deposito 2	Rio Limarí	Cordones Transversales	5,60	21			4,0	4.121	291	5.024	243.466
11	358	IV	Tranque De Relave	Rio Limarí	Cordones Transversales	2,25		Si		9,6	9.012	6.868	8.608	390.213
12	946	V	Dulcinea	Rio Petorca	Cordones Transversales	7,07				3,1	4.323	238	0	109.613
13	421	III	Unión	Copiapó	Pediplanos, Glacis Y Piedemonte	0,79		Si		22,2	1.907	3.000	0	368.491
14	726	IV	Tranque De 1-2	Rio Elqui	Cordones Transversales	3,52	8			4,2	185	14.270	513	189.435
15	258	IV	Indey 3	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,85	8l			14,8	1.200	13.735	151	269.296
16	170	RM	Los Pimientos 1	Quebrada Entre Quebrada La Negra Y Quebrada Pan De Azúcar	Cordillera De La Costa	0,19	26	Si	Si	61,7	47.194	92.641	21.576	118.716
17	950	IV	Desconocido	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,49	7	Si		21,7	11.081	10.324	10.187	232.139
18	333	IV	San Emilio	Rio Limarí	Cordones Transversales	9,99		Si		1,0	5.062	1.486	5.953	230.403
19	87	IV	Tamaya 2	Costeras Rio Elqui - Rio Limarí	Cordones Transversales	6,97				1,5	6.383	3.328	12.707	381.453
20	1118	II	Tranque De Relave	Rio Loa	Precordillera Andina	0,71	19	Si		13,9	4.773	2.807	6.762	381.320
21	1113	IV	Chingoles 2	Rio Los Choros	Pediplanos, Glacis Y Piedemonte	1,53	25	Si		6,3	27.687	40.517	21.046	213.803
22	709	IV	Carlos V	Rio Elqui	Cordones Transversales	2,42	8i			3,3	1.104	15.202	955	230.444
23	1029	II	Embalse De Relave	Quebrada Caracoles	Llanos Del Desierto	6,76				1,2	27.519	57.292	18.708	369.687

ID	ID SRGM	Región	Instalación	Cuenca Hidrológica	Unidad Morfológica	Área [Há]	Grupo	Muro	Derriame	Altura Inferida [m]	Dist. Pobl. [m]	Dist. Agua [m]	Dist. ZOIT [m]	Dist. Volcanes [m]
24	1059	IV	Chingoles 1	Rio Los Choros	Pediplanos, Glacis Y Piedemonte	1,80	25	Si		4,4	27.636	40.566	21.045	369.073
25	85	IV	Huana 2	Rio Limarí	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,25	9			31,4	2.377	304	1.423	294.874
26	231	IV	Los Leones 1	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,86	8b	Si		8,8	2.199	12.512	2.825	119.288
27	159	IV	Relave	Rio Limarí	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	2,92				2,5	5.854	5.694	6.777	273.561
28	82	IV	Tunquen 4 (Ex El Almendro 4)	Rio Choapa	Cordones Transversales	1,06	14a			7,0	13.979	2.502	1.837	369.307
29	380	IV	Deposito	Rio Choapa	Cordones Transversales	0,32	12a			23,2	16.199	10.769	8.215	141.998
30	443	III	Guggiana	Copiapó	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,73	2			9,8	57	142	113	290.581
31	86	IV	Huana 1	Rio Limarí	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,58	9			11,6	2.366	144	1.236	141.998
32	641	IV	John Kennedy 2	Rio Elqui	Cordones Transversales	1,08	8b			6,1	2.042	12.875	2.604	242.625
33	83	IV	Victoria 2	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,62	8g	Si		10,4	444	13.833	1.120	41.547
34	18	III	Capote	Huasco	Cordillera De La Costa	2,52			Si	2,5	23.569	20.824	0	315.192
35	316	IV	Lambert 2	Rio Elqui	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,47	6	Si	Si	13,0	927	146	499	231.316
36	643	IV	Victoria 1	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,49	8g	Si		12,2	398	13.821	1.111	367.590
37	265	IV	Jeraldo 1-2-3	Rio Elqui	Cordones Transversales	1,56	8			3,8	339	14.295	48	367.501
38	242	IV	Tranque De Relave	Rio Elqui	Cordones Transversales	4,15	8c		Si	1,4	1.888	12.463	2.274	253.334
39	271	IV	Tranque De Relave	Rio Elqui	Cordones Transversales	4,16	8a	Si		1,4	2.420	12.170	2.684	381.309
40	252	IV	La Brillante	Rio Elqui	Cordones Transversales	2,54	8a	Si		2,1	2.622	11.973	2.723	112.051
41	642	IV	Los Leones 2	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,40	8b	Si		12,8	2.159	12.470	2.716	368.989
42	1053	III	Tranque De Relave	Costeras E Islas Rio Huasco	Cordillera De La Costa	7,92			Si	0,6	22.928	38.626	19.001	369.080
43	115	IV	Enriqueta	Rio Los Choros	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	1,80	5c	Si	Si	2,7	1.017	17.860	7.840	340.293
44	1111	V	Ramayana 1	Rio Aconcagua	Cordillera De La Costa	1,24				3,9	5.429	346	1.982	147.756
45	632	IV	Esperanza 1	Rio Choapa	Cordones Transversales	0,92	12	Si		5,1	15.686	11.299	8.638	208.279
46	1116	XI	Tranque De Relave 1	Rio Baker	Valle De Lago Glacial	0,29	23	Si		15,3	14.817	0	0	369.580

ID	ID SRGM	Región	Instalación	Cuenca Hidrológica	Unidad Morfológica	Área [Há]	Grupo	Muro	Derriame	Altura Inferida [m]	Dist. Pobl. [m]	Dist. Agua [m]	Dist. ZOIT [m]	Dist. Volcanes [m]
47	773	IV	California 2a	Rio Choapa	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,58	15			7,5	787	283	2.081	141.998
48	1073	IV	Deposito 1	Rio Limarí	Cordones Transversales	2,41	21			1,8	4.172	208	5.074	368.197
49	836	II	Tranque De Relave 1-2-3	Q Entre Q La Negra Y Q Pan De Azúcar	Planicie Marina	0,60	24			7,0	772	104.920	1.154	310.033
50	1092	II	Vista Al Mar 1	Costeras Entre Q La Negra Y Q Pan De Azúcar	Planicie Marina	0,33	24		Si	12,6	569	104.740	1.139	243.920
51	1119	II	Tranque De Relave 2	Rio Loa	Precordillera Andina	1,17	19	Si		3,4	4.735	2.713	6.749	369.374
52	753	IV	Algarrobal (Acopio)	Rio Los Choros	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,43	5b			9,2	1.769	17.410	8.876	308.316
53	392	IV	El Arenal	Rio Choapa	Cordones Transversales	2,84	16			1,4	879	214	9.666	186.637
54	313	IV	Itamar	Rio Elqui	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,48	6	Si		7,1	854	333	502	304.953
55	370	IV	California 2b	Rio Choapa	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,58	15			5,9	747	245	2.071	368.829
56	1117	XI	Tranque De Relave 2	Rio Baker	Valle De Lago Glacial	0,37	23	Si		8,7	14.763	0	0	370.083
57	831	II	Los Pimientos 1	Q Entre Q La Negra Y Q Pan De Azúcar	Cordillera De La Costa	0,19	26	Si	Si	16,8	47.194	92.641	21.576	368.688
58	99	IV	Relaves 1	Rio Choapa	Cordones Transversales	2,16	14b			1,4	13.379	1.944	1.284	231.316
59	797	III	Omega 2	Rio Salado	Pampa Austral	0,44	1			6,8	77.474	11.137	1.138	381.298
60	600	V	Encon	Rio Aconcagua	Cuencas Transicionales Semiáridas	1,76				1,7	64	209	1.699	371.871
61	369	IV	Esperanza Dos	Rio Choapa	Cordones Transversales	0,00	15b			7,9	74	51	433	366.571
62	715	IV	Indey 4	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,60	8l			4,8	1.219	13.780	206	208.486
63	1015	IV	Desconocido	Rio Elqui	Cordones Transversales	1,63	8			1,8	586	14.039	55	368.649
64	657	II	Borras De Relave	Quebrada Caracoles	Llanos Del Desierto	7,16				0,4	26.476	57.444	17.639	307.423
65	1104	IV	Desconocido	Rio Choapa	Cordones Transversales	0,78	21	Si		3,6	7.197	876	6.558	282.143
66	531	III	Omega 1	Rio Salado	Pampa Austral	0,08	1	Si		34,0	77.530	11.074	1.094	246.044
67	1109	XI	Relave La Escondida	Rio Baker	Cordillera Andina	0,82				3,4	3.944	2.990	0	248.982
68	554	V	Hierro Viejo 1	Rio Petorca	Cordones Transversales	0,84	17			3,2	745	190	514	347.675
69	496	IV	Las Rojas 1	Rio Elqui	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,69		Si		3,9	1.380	35	44	368.713

ID	ID SRGM	Región	Instalación	Cuenca Hidrológica	Unidad Morfológica	Área [Há]	Grupo	Muro	Derrame	Altura Inferida [m]	Dist. Pobl. [m]	Dist. Agua [m]	Dist. ZOIT [m]	Dist. Volcanes [m]
70	255	IV	John Kennedy 1	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,39	8b			6,3	2.084	12.812	2.656	340.233
71	244	IV	Tranque De Relave	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,89	8			2,6	338	14.359	388	273.472
72	161	RM	Los Pimientos 1	Q Entre Q La Negra Y Q Pan De Azúcar	Cordillera De La Costa	0,19	26	Si	Si	12,5	47.194	92.641	21.576	369.246
73	1004	IV	Tranque De Relave	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,91	8b			2,5	2.115	12.684	2.715	346.545
74	88	IV	El Algarrobo	Rio Limarí	Cordones Transversales	0,62		Si	Si	3,6	2.868	1.364	1.966	182.802
75	1005	IV	Tranque De Relave 2	Rio Elqui	Cordones Transversales	4,83	8d		Si	0,4	1.705	12.772	2.373	381.328
76	268	IV	Tranque De 1-2	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,74	8	Si		2,7	568	14.655	122	253.354
77	969	V	Tranque 1-2-3-4	Rio Petorca	Cordones Transversales	1,94			Si	1,0	9.197	3.451	2.037	208.341
78	646	IV	Lambert 3	Rio Elqui	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,18	6	Si	Si	10,3	912	137	473	343.589
79	993	IV	Desconocido	Rio Limarí	Cordones Transversales	3,30			Si	0,5	2.281	41	5.105	125.516
80	992	IV	Hernandez 1	Rio Choapa	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,20	15a			8,8	1.595	16	4.805	347.035
81	1018	IV	Desconocido	Rio Elqui	Cordones Transversales	2,29	8			0,8	646	14.671	429	324.652
82	1048	IV	Desconocido	Rio Elqui	Cordones Transversales	2,19	8			0,8	743	14.885	403	310.251
83	1097	IV	Desconocido	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,54	8k			2,8	2.512	15.761	2.206	118.610
84	290	IV	Agua Grande	Rio Los Choros	Cordillera De La Costa	0,30				5,0	13.037	20.108	10.575	142.221
85	978	IV	Agua Grande	Rio Los Choros	Cordillera De La Costa	0,30				5,1	13.265	20.512	10.460	150.636
86	500	IV	Tranque De Relave	Rio Limarí	Cordones Transversales	0,97				1,5	115	528	848	192.549
87	782	IV	Esperanza 0	Rio Choapa	Cordones Transversales	0,82	12	Si		1,8	15.621	11.361	8.706	156.862
88	585	IV	Urquieta 2	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,54	8k	Si		2,7	2.512	15.761	2.206	163.340
89	565	RM	Lo Aguila	Rio Maipo	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	2,43				0,6	1.709	824	1.373	163.337
90	640	IV	La Quiroga 1	Costeras Rio Elqui - Rio Limarí	Cordones Transversales	1,01				1,3	7.019	3.492	13.062	41.546
91	503	IV	San Alberto 3	Costeras Rio Limarí - Rio Choapa	Planicie Marina	3,34			Si	0,4	19.784	13.326	21.197	84.952
92	109	IV	Tranque De Relave	Rio Limarí	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,49	20			0,4	1.495	533	2.669	242.557

ID	ID SRGM	Región	Instalación	Cuenca Hidrológica	Unidad Morfológica	Área [Há]	Grupo	Muro	Derriame	Altura Inferida [m]	Dist. Pobl. [m]	Dist. Agua [m]	Dist. ZOIT [m]	Dist. Volcanes [m]
93	507	IV	Tranque De Relave	Rio Choapa	Cordones Transversales	0,75	16			1,6	979	144	9.752	369.436
94	945	IV	Desconocido	Rio Los Choros	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	1,25	5c	Si		1,0	891	17.734	7.957	158.733
95	633	IV	Esperanza 2	Rio Choapa	Cordones Transversales	0,91	12b	Si		1,3	16.827	10.148	7.563	372.670
96	337	IV	El Bronce	Rio Limarí	Cordones Transversales	0,73	11			1,6	338	7.360	13.109	303.013
97	497	IV	Santa Elena	Rio Elqui	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	1,09	6	Si	Si	1,1	1.020	175	620	308.405
98	303	IV	Tranque De Relave 1-2	Rio Los Choros	Pediplanos, Glacis Y Piedemonte	2,36				0,5	798	8.942	533	368.232
99	986	III	Embalse De Relave	Rio Salado	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	1,41		Si		0,8	54.160	125	2.323	158.831
100	791	III	Las Bombas 3	Costeras Q Pan De Azúcar - Rio Salado	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,29				3,5	37.570	36.260	6.694	309.365
101	251	IV	Tranque De Relave	Rio Elqui	Cordones Transversales	1,54	8f	Si		0,7	733	13.855	1.249	253.098
102	1066	IV	Desconocido	Rio Elqui	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,23		Si		4,2	10.323	9.632	9.747	162.801
103	553	V	Los Molles 1	Costeras Rio Quilimari - Petorca	Planicie Marina O Fluvio Marina	1,81				0,5	12.110	1.021	2.059	215.613
104	645	IV	Lambert 1	Rio Elqui	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,57	6	Si		1,7	937	106	491	346.020
105	1112	V	Ramayana 2	Rio Aconcagua	Cordillera De La Costa	0,87			Si	1,1	6.674	1.458	867	369.038
106	660	II	Relave Sierra Gorda 1	Quebrada Caracoles	Llanos Del Desierto	0,46				2,1	64.665	48.010	5.583	192.655
107	1044	III	Pabellon	Copiapó	Pediplanos, Glacis Y Piedemonte	3,94		Si		0,2	11.728	56	5.069	281.534
108	453	III	Solis 2	Huasco	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	1,09	4			0,8	1.608	164	0	141.998
109	530	III	Tranque De Relave	Rio Salado	Pampa Austral	0,25		Si		3,2	77.001	11.513	726	186.999
110	654	III	Tranque De Relave	Copiapó	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,89	2			0,9	0	158	168	357.325
111	752	IV	San Ramon 1	Rio Los Choros	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,40	5a			1,9	2.289	17.281	9.302	112.026
112	830	II	Los Pimientos 2	Q Entre Q La Negra Y Q Pan De Azúcar	Cordillera De La Costa	0,19	26	Si	Si	4,1	47.288	92.565	21.529	230.461
113	653	III	Tranque De Relave	Copiapó	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional/Pediplanos, Glacis Y Piedemonte	0,90		Si	Si	0,8	14.080	4.513	0	367.507

ID	ID SRGM	Región	Instalación	Cuenca Hidrológica	Unidad Morfológica	Área [Há]	Grupo	Muro	Derriame	Altura Inferida [m]	Dist. Pobl. [m]	Dist. Agua [m]	Dist. ZOIT [m]	Dist. Volcanes [m]
114	1019	IV	Desconocido	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,38	8e			1,7	1.289	13.257	1.904	117.431
115	97	IV	Horizonte 1	Rio Choapa	Cordones Transversales	0,44	13			1,4	13.993	6.258	2.610	332.996
116	817	V	Hierro Viejo 2	Rio Petorca	Cordones Transversales	0,57	17			1,0	738	182	504	244.034
117	360	IV	Camila 1-2	Rio Limarí	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,87	20			0,6	1.504	268	2.793	262.396
118	1047	IV	Hernandez 2	Rio Choapa	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,33	15a			1,7	1.553	59	4.812	111.118
119	772	IV	California 1	Rio Choapa	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,47	15			1,1	807	303	2.102	150.117
120	289	IV	San Ramon 2	Rio Los Choros	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,19	5a			2,6	2.334	17.271	9.338	141.998
121	991	IV	Tranque De Relave	Rio Choapa	Cordones Transversales	0,16	13			3,0	14.063	6.181	2.539	119.302
122	96	IV	Horizonte 2	Rio Choapa	Cordones Transversales	0,48	13			1,0	14.028	6.236	2.591	369.764
123	37	III	Tranque De Relave	Rio Salado	Pampa Austral	0,41				1,2	55.564	931	762	118.431
124	716	IV	Indey 1	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,70	8l			0,7	1.121	13.794	160	119.349
125	1105	IV	Desconocido	Rio Choapa	Cordones Transversales	0,47	21			0,9	7.006	677	6.603	159.194
126	1017	IV	Desconocido	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,13	8z			3,0	1.997	12.506	940	324.679
127	658	II	Relave Planta Soexu	Quebrada Caracoles	Llanos Del Desierto De Atacama	0,61				0,7	22.104	60.742	13.437	274.001
128	681	RM	Anita 1-2	Rio Maipo	Cordillera De La Costa	0,76				0,5	1.297	97	0	121.982
129	114	IV	Tranque De Relave	Rio Los Choros	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,17	5c	Si		1,9	1.015	17.877	7.759	340.159
130	427	III	Andacollo 2	Copiapó	Pediplanos, Glacis Y Piedemonte	0,15	3	Si		2,1	5.813	7.047	0	85.159
131	671	III	Andacollo 1	Copiapó	Pediplanos, Glacis Y Piedemonte	0,48	3	Si		0,7	5.830	7.067	0	273.494
132	1021	IV	Desconocido	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,60	8h			0,5	1.357	15.505	879	165.836
133	655	II	Tranque De Relave	Q Entre Q La Negra Y Q Pan De Azúcar	Cordillera De La Costa	0,81				0,4	26.741	79.600	23.254	186.577
134	1074	IV	Deposito 3	Rio Limarí	Cordones Transversales	0,23	21		Si	1,1	4.061	188	4.962	340.101
135	813	III	Solis 1	Huasco	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	2,18	4			0,1	1.601	176	0	273.548
136	295	IV	Tranque De Relave	Rio Los Choros	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,20		Si		1,0	374	26.642	2.492	315.379

ID	ID SRGM	Región	Instalación	Cuenca Hidrológica	Unidad Morfológica	Área [Há]	Grupo	Muro	Derrame	Altura Inferida [m]	Dist. Pobl. [m]	Dist. Agua [m]	Dist. ZOIT [m]	Dist. Volcanes [m]
137	499	IV	Rivera (Acopio)	Rio Los Choros	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,44	5c	Si		0,4	955	17.816	7.818	118.235
138	1054	III	Tranque De Relave	Costeras E Islas Rio Huasco	Cordillera De La Costa	0,93			Si	0,2	23.813	40.096	19.054	200.737
139	792	III	Las Bombas 2	Costeras Quebrada Pan De Azúcar - Rio Salado	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,13				1,4	37.565	36.250	6.725	118.947
140	953	I	Tranque	Pampa Del Tamarugal	Cordillera De La Costa	1,00				0,2	27.901	35.242	0	368.232
141	1110	XI	Las Chivas	Rio Baker	Cordillera Andina	0,40				0,4	2.028	1.658	0	369.296
142	1067	IV	Desconocido	Rio Limarí	Cordones Transversales	0,39				0,4	972	7.323	12.575	340.062
143	796	III	Omega 3	Rio Salado	Pampa Austral	0,65	1	Si	Si	0,2	77.494	11.110	1.095	369.399
144	456	III	Desconocido	Rio Salado	Pampa Austral	0,37				0,3	77.277	11.208	351	366.703
145	714	IV	Indey 2	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,73	8l			0,2	1.162	13.825	214	376.411
146	954	I	Tranque	Pampa Del Tamarugal	Cordillera De La Costa	0,22				0,5	27.989	35.188	0	249.128
147	587	IV	Desconocido	Rio Limarí	Cordones Transversales	0,15				0,7	14.185	10.176	9.516	319.898
148	368	IV	Atelcura	Rio Choapa	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,22				0,5	7.098	142	11.118	368.770
149	1096	IV	Desconocido	Rio Choapa	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,37	15b			0,3	74	51	433	187.895
150	774	IV	California 0	Rio Choapa	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	0,67	15			0,1	732	241	2.097	118.615
151	958	I	Tranque	Pampa Del Tamarugal	Cordillera De La Costa	0,02				3,8	28.283	35.144	0	368.121
152	964	II	Tranque	Q Entre Q La Negra Y Q Pan De Azúcar	Planicie Marina	2,62				0,0	2.243	103.520	2.487	82.041
153	1002	IV	Acopio	Rio Los Choros	Pediplanos, Glacis Y Piedemonte	0,11				0,5	12.641	19.059	11.252	141.907
154	1055	II	Tranque	Quebrada Caracoles	Llanos Del Desierto	6,14				0,0	64.441	47.311	5.199	149.187
155	399	V	Petronila Diaz	Rio Petorca	Cordones Transversales	0,67				0,1	40	111	163	340.298
156	722	IV	Relaves Antiguos	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,53	8b			0,1	2.223	12.564	2.834	249.066
157	277	IV	Tranque 1-2	Rio Elqui	Cordones Transversales	1,63	8j			0,0	2.219	15.577	1.915	242.592
158	515	III	Tranque De Relave	Huasco	Llanos De Sedimentación Fluvial O Aluvional	13,39				0,0	2.784	586	2.864	368.297
159	302	IV	Las Breas (Acopio)	Rio Los Choros	Cordones Transversales	0,44				0,1	35.517	30.636	24.343	85.283

ID	ID SRGM	Región	Instalación	Cuenca Hidrológica	Unidad Morfológica	Área [Há]	Grupo	Muro	Derrame	Altura Inferida [m]	Dist. Pobl. [m]	Dist. Agua [m]	Dist. ZOIT [m]	Dist. Volcanes [m]
160	1016	IV	Desconocido	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,04	8m			0,4	1.883	12.969	483	189.320
161	1115	RM	Los Carreras	Rio Maipo	Cordillera De La Costa	1,00	22			0,0	3.196	209	6.654	356.365
162	955	I	Relave 1	Rio Loa	Precordillera Andina	0,01	18			1,3	23.660	21.712	43.409	369.168
163	956	I	Relave 3	Rio Loa	Precordillera Andina	0,01	18			1,3	23.664	21.710	43.411	181.655
164	957	I	Relave 2	Rio Loa	Precordillera Andina	0,02	18			0,6	23.668	21.706	43.416	84.962
165	1114	RM	Gringo Tichagua	Rio Maipo	Cordillera De La Costa	0,60	22			0,0	3.146	154	6.728	41.543
166	776	IV	Tunquen 5 (Ex El Almendro 5)	Rio Choapa	Cordones Transversales	2,73	14a			7,3	13.857	2.385	1.725	214.623
167	1022	IV	Desconocido	Rio Elqui	Cordones Transversales	1,94	8	Si		1,5	699	14.802	274	165.844
168	243	IV	Tranque De Relave	Rio Elqui	Cordones Transversales	1,26	8	Si	Si	0,9	596	14.802	151	148.989
169	279	IV	Urquieta 1	Rio Elqui	Cordones Transversales	0,54	8k			1,3	2.535	15.752	2.225	367.572
170	253	IV	Tranque De Relave	Costeras Rio Elqui - Rio Limarí	Cordones Transversales	0,28		Si		1,3	6.181	14.477	86	230.384
171	1125	VI	Desconocido	Rio Rapel	Cordillera De La Costa	0,58				0,2	342	205	336	369.457
172	1127	II	Los Pimientos 1	Q Entre Q La Negra Y Q Pan De Azúcar	Cordillera De La Costa	0,00	26	Si	Si	16,8	47.194	92.641	21.576	232.096
173	1128	II	Los Pimientos 1	Q Entre Q La Negra Y Q Pan De Azúcar	Cordillera De La Costa	0,00	26	Si	Si	16,8	47.194	92.641	21.576	192.614

Anexo C: Propuesta de instrumentación invasiva

La instrumentación invasiva requiere la instalación de equipos y tecnologías de manera permanente o discontinua para la medición de parámetros in-situ y monitoreo de comportamiento de las obras. Requieren la irrupción en el lugar que se desea medir y la destrucción y modificación del objeto a medir. A continuación, se describen los instrumentos utilizados comúnmente en depósitos de relaves para la medición de presiones de poro, movimientos (verticales y horizontales) y aceleraciones sísmicas.

Piezómetro

El piezómetro es un instrumento utilizado para medir la presión de poros, nivel freático y filtraciones, instalados comúnmente en el muro de arenas de tranques de relaves. Acorde al informe emitido por Fundación Chile (2017), estos instrumentos son los más comúnmente usados en los depósitos de relaves. El tipo de piezómetro a seleccionar para cada estudio específico depende de las características de funcionamiento del piezómetro y de su precisión (Suárez, 2009).

Existen dos procedimientos de instalación: abierto o cerrado; y existen diversos transductores para medir dentro del piezómetro: pozómetro, Casagrande, cuerda vibrante, entre otros. A continuación, se describen los tipos de instalación.

- **Piezómetro abierto:** consiste en aislar un tramo de sondeo, mediante tapones bentoníticos, e instalar una tubería ranurada, exclusivamente en el citado tramo y abierta en su extremo superior, midiendo la altura del agua correspondiente a dicho tramo o altura piezométrico del mismo. Son instrumentos de bajo costo, confiables a largo plazo y lectura sencilla (Figura 0.1 a) (González et al, 2002).
- **Piezómetro cerrado:** El procedimiento consiste en instalar un sistema de lectura o transductor en un punto previamente aislado de un sondeo, registrándose la presión intersticial en dicho punto que se trasmite a una unidad de lectura situada en el exterior del sondeo. Tienen la ventaja que el tiempo de respuesta es más corto y son de mayor precisión (Figura 0.1 b) (González et al, 2002).

A continuación, se detallan los tipos de transductores comúnmente utilizados:

- **Pozómetro:** instrumento usado para permite medir con precisión milimétrica la profundidad a la que se encuentra el agua.
- **Piezómetro de Casagrande:** consta de un aparato filtrante poroso y dos tubos de distinta longitud de entrada y de salida. También pueden incorporar un sensor térmico para medir simultáneamente temperatura (Figura 0.2).
- **Piezómetro de cuerda vibrante:** transductor de presión instalado en el interior de un diafragma cilíndrico de acero inoxidable dotado de un filtro (piedra porosa). La deformación del diafragma es proporcional a la carga hidráulica y modifica la tensión de la cuerda que, excitada durante la medición, vibra con frecuencias proporcionales al nivel de tensión y, por ende, a la carga hidráulica operante sobre el diafragma. Estos piezómetros se pueden instalar tanto abiertos como cerrados (Figura 0.3).

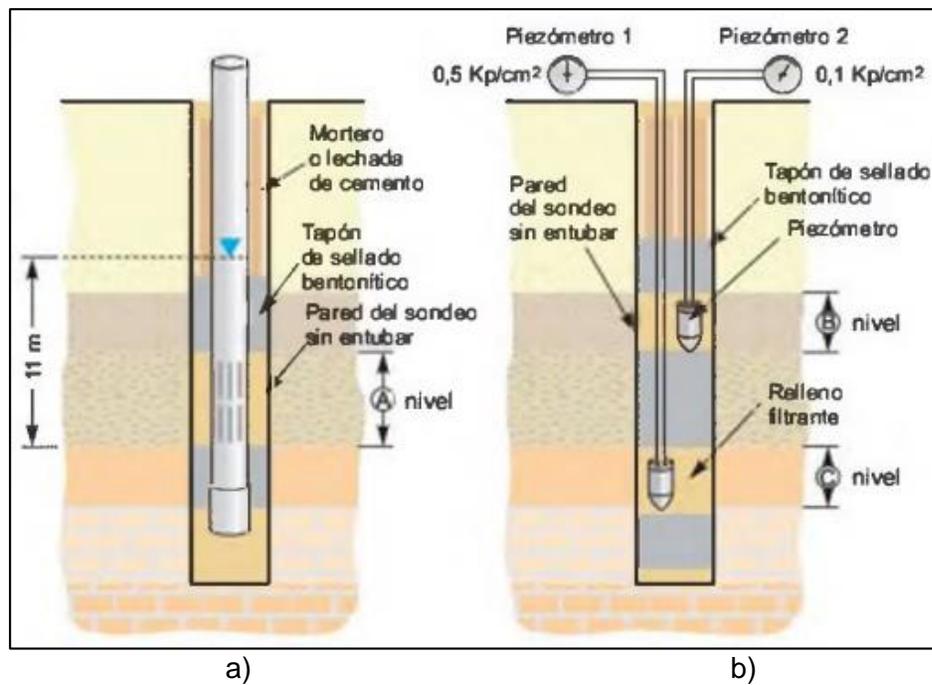


Figura 0.1 Tipos de intalacion de piezómetros a) Abierto, b) Cerrado (González, 2002)

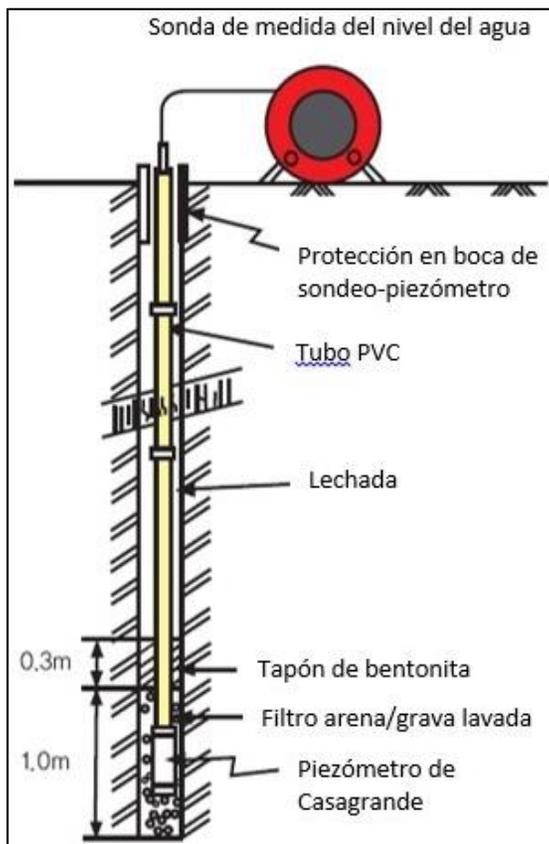


Figura 0.2 Piezómetro de tubo abierto tipo Casagrande (SENSOGEO)

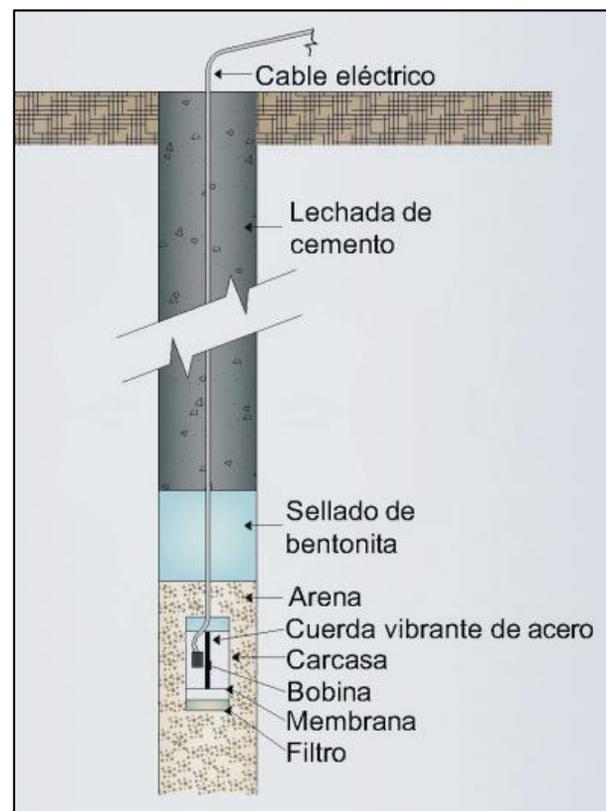


Figura 0.3 Piezómetro de tubo cerrado de cuerda vibrante (HCC)

En la Tabla 0.1 se presentan la variedad de piezómetros que se utilizan hoy en día en Chile y el mundo, tanto en tranques de relaves como en otras instalaciones.

Tabla 0.1 Métodos o tecnologías para la medición de presiones de poro en depósitos de relaves y su aplicación en Chile y el mundo (Modificado de Castillo, 2016).

Métodos o tecnologías	En línea		Frecuencia usual	Se aplica hoy en Chile en tranques de relave	Se aplica hoy en Chile en otras instalaciones	Se aplica hoy en el mundo en tranques de relave	Se aplica hoy en el mundo en otras instalaciones
	Si	No					
Piezómetro abierto + pozómetro	x		1 sem/ 1 mes	Si	Si	Si	Si
Piezómetro abierto + cuerda vibrante		x	1 h	Si	Si	Si	Si
Piezómetro múltiple cuerda vibrante		x	1 h	Si	Si	Si	Si

Inclinómetro

Los inclinómetros constituyen uno de los principales métodos de investigación de deslizamientos y, en general, de control de movimientos transversales en un sondaje en el suelo (González et al., 2002).

Miden las inclinaciones en diversos puntos al interior de un sondaje por medio de una sonda que transmite una señal eléctrica proporcional a la inclinación. Las diferencias entre las medidas realizadas en diversos puntos y los tiempos en que se toman las medidas, permiten conocer y cuantificar los movimientos transversales al sondaje (González et al., 2002).

Típicamente, un sistema de inclinómetro está compuesto por: (Suárez, 2009)

- Un tubo guía instalado dentro de una perforación con guías longitudinales para orientar la unidad sensora.
- Un sensor portátil montado sobre un sistema de ruedas que se mueven sobre la guía del tubo.
- Un cable de control que baja y sube el sensor y transmite señales eléctricas a la superficie. El cable tiene unas marcas para medir profundidades.
- Un equipo de lectura en la superficie, recibe las señales eléctricas, presenta las lecturas y puede guardar y procesar los datos.

En la Figura 0.4 a) se muestra la instalación de un inclinómetro y un esquema de desplazamiento mientras que en la Figura 0.4 b) y c) se muestran un ejemplo de las lecturas y resultados obtenidos mediante este instrumento, respectivamente.

Se instalan comúnmente en perforaciones previamente muestreadas. Se recomienda que la porción baja del tubo se encuentre entre 3 a 6 metros por debajo de los sitios donde se espera observar movimientos. La idea es que la curva de deformación del inclinómetro muestre la diferencia entre la zona profunda que no se mueve y la que presenta movimiento (Figura 0.4 a).

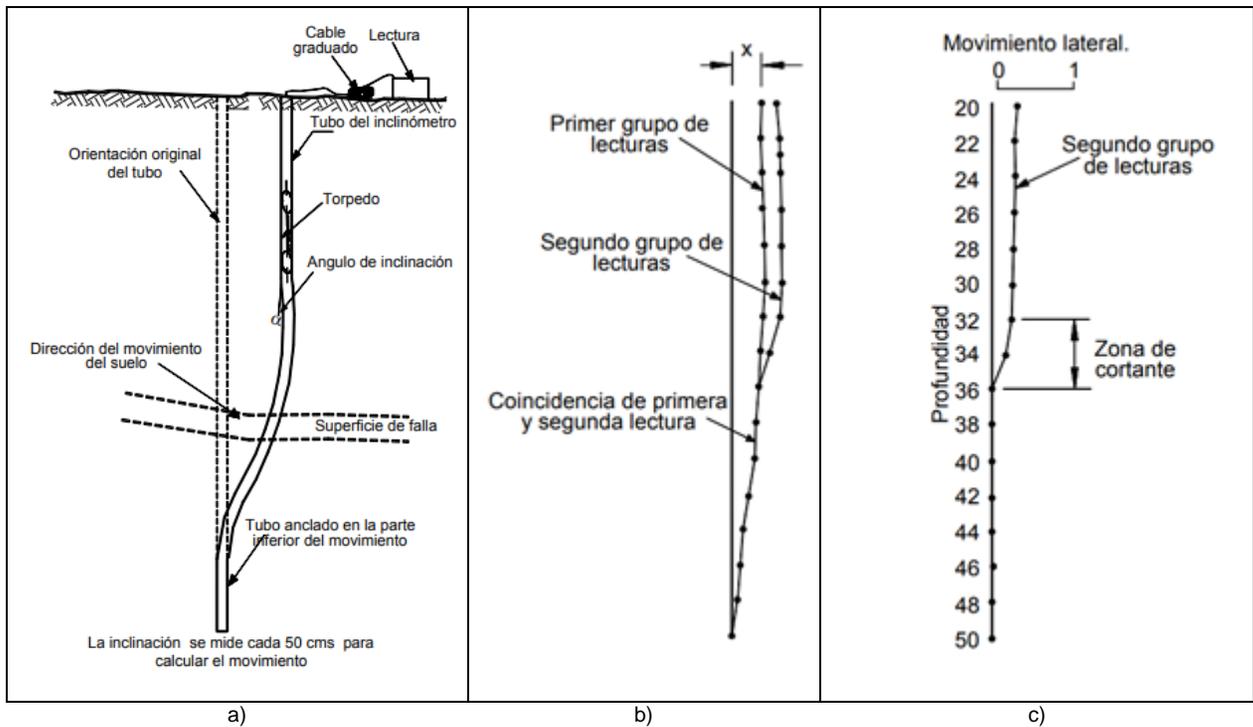


Figura 0.4 Esquema de a) desplazamiento, b) lecturas y c) resultados obtenidos de un inclinómetro (Suárez, 2009).

Este instrumento es “probablemente la herramienta más útil y disponible para un analista de deslizamientos” (Suárez, 2009) ya que son capaces de entregar la siguiente información (Suárez, 2009):

- Profundidad de los movimientos del deslizamiento
- Espesor de la zona de corte
- Velocidad del desplazamiento
- Dirección del desplazamiento
- Magnitud del desplazamiento

En la Tabla 0.2 se presentan dos tipos de inclinómetros y su aplicación en Chile y el mundo.

Tabla 0.2 Métodos o tecnologías para la medición de desplazamiento horizontal interno en depósitos de relaves y su aplicación en Chile y el mundo (Modificado de Castillo, 2016).

Métodos o tecnologías	En línea		Frecuencia usual	Se aplica hoy en Chile en tranques de relave	Se aplica hoy en Chile en otras instalaciones	Se aplica hoy en el mundo en tranques de relave	Se aplica hoy en el mundo en otras instalaciones
	Si	No					
Inclinómetro manual		x	1 mes	Si	Si	Si	Si
Inclinómetro automático (SAA)	x		1 h	No	No	Si	Si

Acelerógrafo

El acelerógrafo es un instrumento que utiliza acelerómetros para medir y registrar la historia de aceleraciones producidas por un evento sísmico, en función del tiempo.

En ingeniería geotécnica, se utilizan acelerómetros triaxiales, que son capaces de registrar aceleraciones en los tres ejes de coordenadas. La importancia del monitoreo de esta variable es el poder verificar si el diseño del depósito fue realizado correctamente y además, generar una base de datos que se podrá utilizar en proyectos similares.

Acorde al Informe de Conceptualización (2015), son utilizados en Chile y el mundo tanto en tranques como en otras obras de ingeniería para monitorear sismos. Sus lecturas son en línea y en general se activan al sobrepasar cierto umbral de aceleración. En tranques chilenos, se instalan generalmente en el muro, tanto en la base como el coronamiento.

Monolitos de control topográfico

Los monolitos son una gama de productos topográficos utilizados en construcción, topografía y viticultura, entre otros mercados. Se utilizan para señalar puntos de referencia en terreno.

Están compuestos por una cabeza o hito propiamente tal y un anclaje para la fijación de dicha cabeza al terreno. Existen en diferentes materiales, colores y tamaños (tanto del hito como del anclaje) para responder a las diferentes necesidades.

Anexo D: Propuesta de ensayos de terreno

Como se mencionó previamente, la instrumentación semi-invasiva requiere la irrupción en el lugar de trabajo, pero no destruye ni modifica el objeto medido. En general, esto representa la principal ventaja de estos métodos por sobre las técnicas invasivas: entregan información subsuperficial con mediciones en superficie, abaratando costos y tiempos.

MSHA (2010) dedica un capítulo a las técnicas geofísicas y las divide en dos categorías: estudios superficiales y mediciones desde pozos. En este apartado, se detallan las primeras, por su facilidad, rapidez y costo de ejecución.

Ensayos geofísicos no invasivos

Dentro de los métodos sísmicos de la geofísica aplicada se encuentran los de refracción y reflexión sísmica. En estos métodos se mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas, transcurrido entre un sitio donde se generan ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de observación. Para esto se disponen una serie de sensores en línea recta a distancias conocidas, formando lo que se conoce como línea de refracción sísmica. A una distancia conocida del extremo del tendido, en el punto de disparo, se generan ondas sísmicas, con la ayuda de un martillo o la detonación de explosivos, los cuales inducen vibraciones en el terreno que son detectadas por cada uno de los sensores del arreglo (Correia, 2015).

Este tipo de ensayos han sido adoptados por la ingeniería geotécnica para poder estimar la velocidad de onda de corte en la profundidad. De acuerdo a la fuente de excitación que se utilice pueden clasificarse como pasivos o activos, siendo los activos aquellos que utilizan una fuente externa que genere una vibración en el medio (caída de un peso, como un mazo o martillo), mientras que los ensayos pasivos utilizan la vibración medioambiental como fuente (ruido). Otra forma de clasificar este tipo de ensayos, es si necesitan de un sondaje o no para poder realizar la medición. En el caso de necesitarlo, se les conoce como ensayos invasivos, es decir, la instrumentación debe ser instalada en profundidad dentro de uno o más sondajes. Por otro lado, los ensayos no invasivos no consideran la extracción de muestras ni la necesidad de realizar uno o más sondajes de perforación (Humire et al., 2015; Correia, 2015).

También es posible diferenciar los ensayos geofísicos por el tipo de onda que analizan, ya sea las ondas de cuerpo u ondas superficiales. Las ondas de cuerpo compresionales (onda P) y de corte (onda S) viajan a través del interior de la tierra. Las ondas P comprimen y dilatan el medio en la dirección de propagación (Figura 0.1a), mientras que las ondas S se propagan con movimientos en un plano perpendicular a la dirección de la propagación (Figura 0.1b). Por otro lado, las ondas superficiales surgen de la interacción de las ondas de cuerpo, la superficie de la tierra y una capa superficial. Las ondas Rayleigh se generan por la interacción de las ondas P y SV (ondas S verticales), y generan un movimiento de partícula horizontal y vertical que está contenido en el plano de propagación de la onda como un movimiento elíptico (Figura 0.1c). Por otra parte, las ondas Love son el resultado de la interacción de las ondas SH con la superficie, lo que

implica que el movimiento de partícula es puramente de corte y perpendicular al plano de propagación de la onda (Figura 0.1d) (Sáez, 2016).

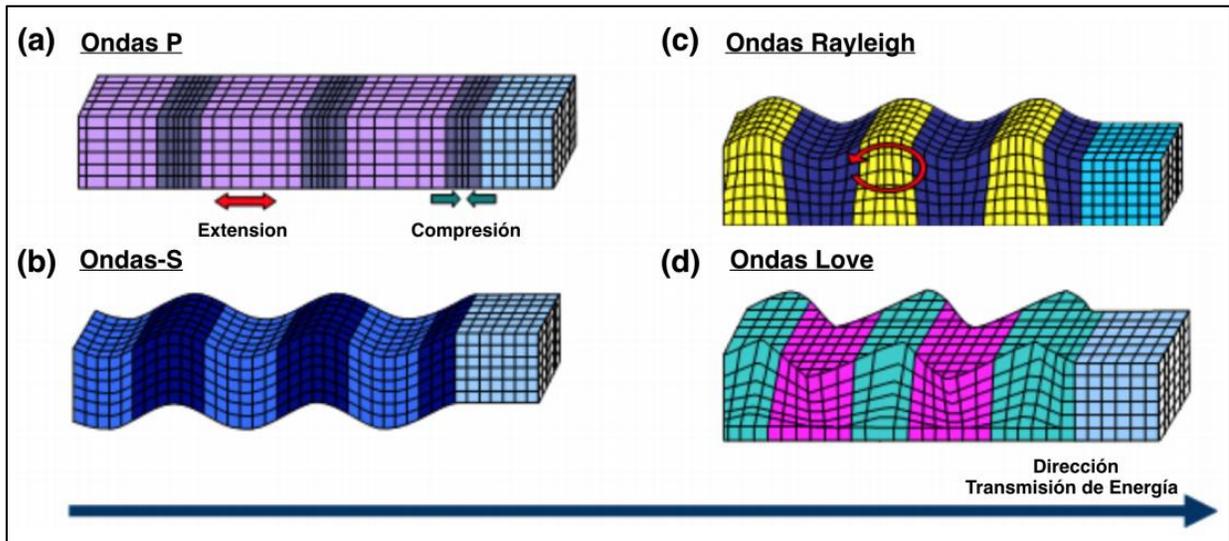


Figura 0.1 Efectos mecánicos de las ondas sísmicas. Ondas de cuerpo (a) ondas P y (b) ondas S. Ondas superficiales: (c) ondas Rayleigh y (d) ondas Love (Sáez, 2016).

A continuación, se exponen los principales aspectos de los ensayos no invasivos, pasivos y activos que analizan diversos tipos de onda.

Métodos basados en ondas de cuerpo

Existen métodos que utilizan las ondas de cuerpo, como lo es ensayo de Refracción sísmica, descrito a continuación.

- Refracción sísmica: normada por la ASTM D5777-00, consiste en medir la primera llegada de la onda P y/o la onda S a diferentes distancias de la fuente sísmica. La aplicación más común de esta técnica es para determinar la profundidad de la roca, para lo cual se requiere que la velocidad del estrato superior (suelo, roca erosionada o blanda) sea menor que la del estrato inferior (roca competente). Además, es posible calcular el nivel freático, estratigrafía, litología, estructuras y fracturas del subsuelo. Usualmente, se utiliza un martillo para generar las ondas sísmicas y estudiar profundidades del orden de 15 metros. Inicialmente, las ondas sísmicas viajan solamente por el suelo hasta llegar a los geófonos (transductor de vibraciones). Además, las ondas refractadas también son detectadas. En función de donde se desea obtener información y su profundidad, se elige el largo del arreglo de geófonos, su distribución, espaciamiento y la ubicación de los perfiles. Como regla general, el largo del arreglo debe ser al menos 4 veces la profundidad de interés (MSHA, 2010).

Existen otros ensayos que miden ondas de cuerpo y determinan la velocidad de onda de corte, como el ensayo downhole y crosshole, ambos invasivos. No ha sido descrito en

este trabajo debido al alto coste de realizar un sondaje, pero existe vasta información en la literatura.

Métodos basados en ondas superficiales

En 2015, Humire, Sáez y Leyton publican el “Manual de aplicación de técnicas geofísicas basadas en ondas de superficie para la determinación del parámetro VS30” que tiene por objetivo “establecer procedimientos y recomendaciones para la determinación del promedio armónico de la velocidad de propagación de onda de corte en los primeros metros bajo la superficie, mediante técnicas basadas en la dispersión de ondas de superficie, con énfasis en los primeros 30 metros”.

Entre los métodos pasivos, destaca:

- Técnica de relaciones espectrales H/V: También conocido por su nombre en inglés Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR), es una técnica pasiva que requiere una sola estación y, en principio, solo un operador. Consiste en medir por algunos minutos, con un sismómetro de tres componentes, las vibraciones ambientales en un punto y luego construir una curva representativa de las relaciones espectrales (H/V) en función de la frecuencia de vibración. Las frecuencias donde se encuentren máximos corresponden a las frecuencias predominantes del suelo. Además, esta técnica permite realizar estudios estratigráficos del subsuelo. Se puede utilizar preliminarmente para identificar los puntos más representativos en los cuales afinar el estudio con otras técnicas o bien para verificar la existencia de heterogeneidades significativas (Riente, 2018).
- Microvibraciones: Acorde a Peña et al. (2018), esta técnica se utiliza para monitorear el comportamiento de volcanes, minería subterránea, campos geotermales, zonas con actividad en fallas y caracterización de respuesta sísmica de sitio. Recientes experimentos de laboratorio han demostrado que este método es capaz de detectar erosión interna en los muros, uno de los mecanismos de falla relevantes en depósitos de relaves. Además, según Olivier (2018), el análisis de microvibraciones puede ser un método económico, rápido y no invasivo para construir la estructura interna de los depósitos de relaves. El procedimiento consiste en instalar geófonos por un intervalo de tiempo y distribuidos acorde a la información y ubicación que se desea estudiar. Dependiendo de la técnica que se ocupe, se analizan diferentes ondas. En un suelo arenoso, las ondas P y S tienen respuestas opuestas a la saturación: velocidad de onda P aumenta, velocidad de onda S disminuye con saturación.

Método SASW

El método SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) es un método no invasivo activo relativamente nuevo para la determinación in situ de perfiles de velocidad de onda de corte.

Este método consiste en la medición de la onda dispersiva en superficie en el sitio de interés y la interpretación de ésta para obtener un perfil de velocidad de onda de corte en

profundidad. Se utiliza una fuente dinámica para generar ondas superficiales a diferentes frecuencias o longitudes de onda, las cuales son monitoreadas por dos o más receptores ubicados a ciertas distancias. Los datos de las ondas progresivas y reversas se promedian juntas.

El método SASW ofrece ventajas significativas en contraste con las mediciones invasivas, las cuales son estimaciones puntuales de la velocidad de onda de corte. SASW es una prueba global, lo que quiere decir que se puede estudiar una zona superficial de mayor volumen. En los sitios que son favorables para la propagación de ondas de superficie, el método SASW permite ahorros considerables de tiempo y costos.

Método MASW

El método MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) es uno de los métodos sísmicos de evaluación de la condición elástica del suelo para fines de ingeniería geotécnica. Las mediciones de ondas sísmicas superficiales generadas a partir de diversas fuentes como mazos, analizan la velocidad de propagación de las ondas superficiales y finalmente deduce las variaciones de la velocidad de ondas de corte (V_s) bajo la zona estudiada.

El procedimiento común para muestreos de MASW en 1D, 2D y 3D consta de tres pasos:

1. Adquisición de datos: mediante registros de campo
2. Análisis de dispersión: extracción de curvas de dispersión de cada registro
3. Inversión: cálculo de V_s en profundidad

Para un análisis 2D, se genera un mapa de V_s , el que se construye a través de un esquema de interpolación adecuado mediante la colocación de cada perfil de 1D de V_s en una ubicación superficial correspondiente a la mitad de la línea del receptor.

El estudio con fuente activa es el más común utilizado. La profundidad máxima que puede lograrse en la investigación es usualmente entre 10 a 30 m, pero puede variar de acuerdo al sitio y tipo de fuentes activas utilizadas. Las ondas superficiales mejor generadas son en terrenos planos, con una menor variación topográfica dentro de la una línea en la zona de estudio.

A diferencia de los métodos de medición directa de la velocidad de onda de corte, lo cual es notoriamente difícil debido a las dificultades de mantener una razón ruido/señal favorable durante la adquisición y etapas de procesamiento, MASW es uno de los métodos sísmicos más fáciles que entregan resultados competentes. La adquisición de datos es significativamente más tolerante que en otros métodos debido a la facilidad con que se mantiene la razón señal/ruido favorable para la medición. Esta razón señal/ruido es el factor que hace que las ondas de corte superficiales sean las ondas sísmicas más fuertes generadas que pueden viajar distancias mayores que las ondas de cuerpo sin sufrir de contaminación por ruidos externos.

El método MASW posee una mayor capacidad para discriminar la señal útil en medio de niveles nocivos de ruido, con la cual asegura una mayor resolución en la extracción de la señal que se pueda ver afectada por factores tales como viento, truenos o tráfico. En

consecuencia, el procedimiento general de adquisición de datos y el paso posterior de procesamiento de datos es altamente eficaz y tolerante.

El concepto de multicanal es análogo a la resolución en tecnología de imagen digital. A medida que sea mayor el número de bits disponibles, se consigue una resolución de color más amplia, mientras que la mayor resolución de imagen se consigue a medida que más píxeles se utilizan para capturar la imagen. El concepto de número de canales juega un papel similar a los de los conceptos de bits y píxeles en la delimitación de la información del subsuelo.

SASW vs MASW

Ambos métodos utilizan la propiedad de dispersión de las ondas Rayleigh con el propósito de generar un perfil de velocidad de ondas de corte en profundidad.

El método SASW utiliza solo dos receptores para el registro de las ondas superficiales generadas por la fuente sísmica utilizada en el muestreo. Por ello las pruebas deben repetirse con varias configuraciones en campo: diferente fuente sísmica y diferente arreglo de receptores, con el fin de cubrir diferentes profundidades de investigación. Además, las pruebas deben realizarse en dos direcciones para cubrir los efectos de cualquier fase interna que afecte la instrumentación. La necesidad de repetir las pruebas también se justifica con el propósito de disminuir la influencia del ruido aleatorio o de ambiente.

Al momento de realizar un estudio empleando métodos de ondas superficiales se recomienda entregar, como mínimo, los siguientes elementos (Humire et al., 2015):

- Formas de ondas: Todos los registros de las formas de ondas utilizadas para la elaboración de la CD, ya sean de tipo pasivo o activo. Se debe especificar claramente el formato en el cual se han almacenado; en caso de tratarse de un formato particular no estándar, se deberán entregar una copia en archivo texto (ASCII).
- Metadata: Información de cada uno de los registros entregados, con la posición de los geófonos durante las mediciones, intervalo de tiempo utilizado y cualquier otro aspecto necesario para el proceso de los datos.
- Curvas de dispersión obtenidas: se deben entregar en modo gráfico como en una tabla velocidad versus periodo (o cualquier variante de ellos, como lentitud y frecuencia).
- Ajuste a las curvas de dispersión: se debe presentar gráficamente, el ajuste que el modelo seleccionado hace a los datos medidos en terreno a la CD.
- Modelo de velocidad de onda de corte: una tabla con el modelo de velocidad que mejor ajuste los datos medidos.
- En lo posible, entregar estimaciones de los errores con una explicación del método usado para su determinación.

Resistividad Eléctrica

El principal objetivo de esta técnica es determinar la distribución de resistividad del subsuelo mediante mediciones superficiales. De estas mediciones, se estima la verdadera resistividad y sus variaciones o anomalías, que pueden indicar profundidad del estrato rocoso, infiltraciones, heterogeneidades (estratificaciones, foliación, fracturas), mineralogía, áreas de percolación de agua, entre otras cosas. La resistividad del suelo se puede ver afectada por diversos parámetros físicos, tales como el mineral, contenido de fluidos, porosidad y grado de saturación (MSHA, 2010; Gragengia et al., 2011).

Normalmente, el ensayo se realiza con cuatro electrodos, dos que inducen la corriente al suelo y dos que miden la diferencia de potencial (voltaje). Este ensayo es útil para obtener perfiles en profundidad, identificando la ubicación del nivel freático, infiltraciones y estratos de suelo.

Potencial Espontáneo

De manera similar a la técnica anterior, el potencial espontáneo (SP, Spontaneous o Self-Potential) mide potenciales eléctricos (diferencias de voltajes) naturales. Una de las fuentes es el movimiento de agua en medios porosos, por lo que se puede evaluar filtraciones si los potenciales generados tienen la suficiente magnitud para ser medidos.

El equipo a utilizar consiste en un par de electrodos no polarizados y un voltímetro de alta impedancia. Uno de los electrodos se ubica en una ubicación conveniente en el suelo y se mantiene inmóvil (llamado "base"). Se conecta al voltímetro. El segundo electrodo, o "electrodo de medición", se mueve de punto en punto en la distribución planeada, donde se mide la diferencia de potencial entre ambos electrodos. Se obtienen perfiles de resistividad con zonas de potenciales negativas, donde se identifican áreas de infiltraciones (MSHA, 2010).

Densidad in situ mediante cono de arena

Método de ensayo estándar para determinar la densidad del suelo in situ por el método del cono de arena, normado por ASTM D 1556-82.

Este método es muy difundido para determinar la densidad de suelos compactados (terraplenes de tierra, rellenos de carretera y estructuras de relleno) y de suelos naturales, agregados, mezclas de suelo u otro material similar y cuyo tamaño de partículas es menor que 50 mm. En general, está limitado a un suelo en condición no saturada.

Se utiliza un aparato de densidad, arena, balanzas y equipo de secado (horno), además de equipo misceláneo, como cuchillo, espátula, entre otros.

El ensayo consiste en llenar un hueco de suelo previamente excavado con arena. Se mide la arena sobrante y por ende, se obtiene la masa utilizada en el ensayo. Con estos datos, es posible calcular la masa del material que ha sido removido del hueco del ensayo.

Penetrómetro de Cono Dinámico (DCP)

El penetrómetro de cono dinámico (DCP por sus siglas en inglés) es un dispositivo de prueba para medir resistencia y variabilidad de suelos y material granular. Se ha mostrado un aumento en su uso por parte de organizaciones de Canadá y Estados Unidos dedicadas al transporte debido a su capacidad única de generar un perfil de características del subsuelo. En este afán, el Ministerio de Transportes de Minnesota lideró el uso inicial de los DCP debido a sus ventajas operacionales: es un equipo portátil y simple de usar (Burnham and Johnson, 1993).

El equipo se esquematiza en la Figura 0.2. Comúnmente, el equipo cuenta con una varilla, pero es posible aumentar la profundidad de estudio agregando más varillas.

Para operar, el equipo requiere dos personas: una que opere el martillo y otra para medir la profundidad de penetración. En el caso de usar un dispositivo láser, el ensayo puede realizarlo una persona. De manera general, el ensayo consiste en hincar el cono y barras en el suelo a estudiar mediante golpes del martillo, teniendo en mente mantener la verticalidad de las barras.

Los resultados se pueden medir midiendo la penetración en milímetros por cada golpe (conocido como DPI o índice de penetración DCP) o considerando la penetración en milímetros para un número de golpes preestablecido (comúnmente, 5 ó 10 golpes)

Existen correlaciones entre el DPI y un amplio rango de parámetros (por ejemplo, Mohammadi et al., 2008). Basado en los resultados de los experimentos, se pueden obtener relaciones entre el DPI y densidad relativa, módulo de elasticidad, módulo de corte, módulo de balasto, ángulo de fricción, humedad, y otros parámetros. Es importante destacar que es necesario realizar ensayos con arenas de relaves chilenos, con especial atención en los depósitos abandonados, ya que pueden tener características diferentes a las arenas de relaves más recientes.

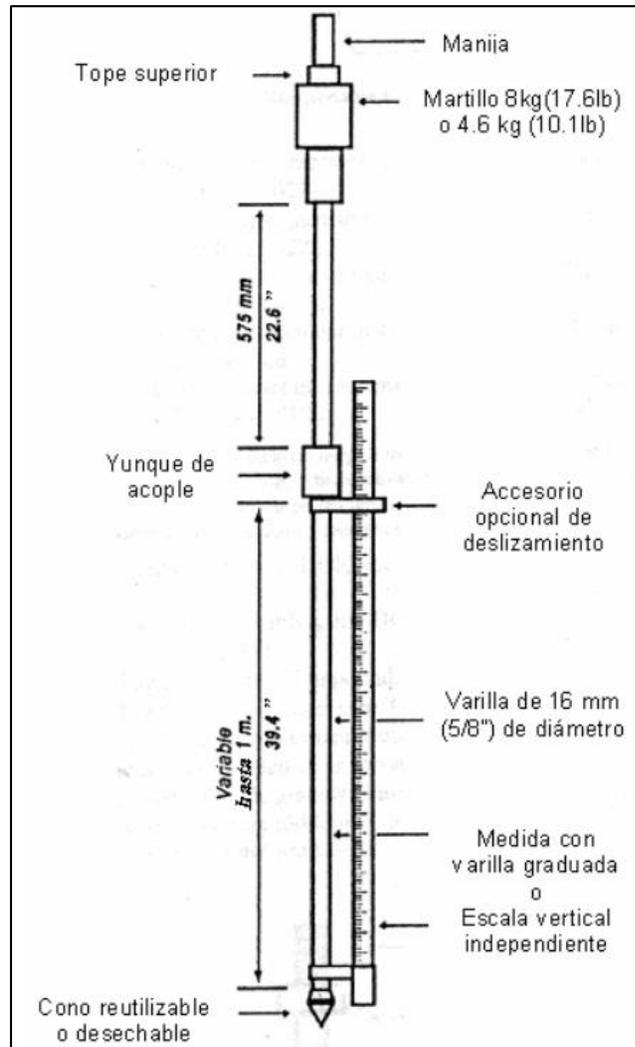


Figura 0.2 Esquema del dispositivo DCP .

Penetrómetro ligero PANDA

El Grupo Geotécnica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso junto a la compañía Geotecnia Ambiental Ltda. han trabajado por más de 10 años en el uso del penetrómetro ligero PANDA (Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté par Ordinateur) para determinar la estabilidad de los depósitos de relaves. Como resultado, han publicado la Norma NCh3261-1Of.2012 “Depósitos de relave - Control de compactación con penetrómetro dinámico ligero” y otros documentos.

La NCh3261 presenta los penetrómetros dinámicos ligeros como “una alternativa para realizar el control de compactación de depósitos de relaves” mientras que, en 2013, Espinace, Villavicencio y Lemus destacan que esta tecnología es “rápida, no destructiva, portable, fácil de utilizar, sustentable medioambientalmente y capaz de producir resultados inmediatos”.

El ensayo consiste en penetrar en el suelo un tren de barras con una punta metálica maciza, mediante la aplicación de una energía dinámica de hincado. Ésta es generada por el impacto de un martillo, de masa normalizada, sobre una cabeza de golpeo conectada al tren de barras. A diferencia de métodos de energía constante (golpes de martillo normalizado a altura constante), este penetrómetro permite determinar el índice de resistencia a la penetración en función de la profundidad. Se registra de manera continua la penetración para cada golpe de martillo alcanzada y la resistencia dinámica de punta del suelo (qd). La profundidad máxima de penetración para el control de compactación es del orden de 1,5 [m] y entre 6,0 [m] y 7,0 [m] para una caracterización en profundidad (Espinace, Villavicencio y Lemus, 2013).

Las principales aplicaciones en depósitos de relaves son evaluar los siguientes aspectos:

- Espesor de una capa o de un conjunto de capas depositadas para la construcción del muro resistente.
- Grado de compactación de una capa o de un conjunto de capas depositadas, considerando la variabilidad de las características físicas de las arenas de relaves, la densidad in situ y el estado hídrico asociado que presenta el material al momento de realizar el control. En estos casos, es necesario hacer una calibración en laboratorio para el equipo empleado.

Las investigaciones previamente mencionadas determinan mediante correlaciones parámetros geotécnicos (ángulo de fricción y densidad relativa) a partir de los ensayos PANDA. Se llevan a cabo mediante calibraciones in-situ y en laboratorio para obtener curvas de controles para diferentes tipos de arenas de relaves (Espinace, R., Villavicencio, G. y Lemus, L., 2013).

Teniendo en cuenta la investigación realizada por estos autores, junto a antecedentes del comportamiento de depósitos de relaves chilenos sometidos a cargas sísmicas importantes, el criterio ocupado en Chile por ingenieros consultores para el diseño y control geotécnico de depósitos de relaves y los resultados obtenidos de ensayos PANDA y SPT, han propuesto una clasificación inicial para determinar el potencial de licuefacción de los depósitos de relaves (Espinace, R. Villavicencio, G. y Lemus, L., 2013).

Con la extensiva base de datos de los ensayos PANDA en depósitos de relaves de la III, IV y V Región, se han propuesto bandas empíricas de compacidad y señales PANDA para identificar la calidad de compactación de los depósitos de relaves chilenos.

Es importante destacar que si bien se han obtenido correlaciones entre el DPI del Penetrómetro de Cono Dinámico (DCP) y un amplio rango de parámetros (densidad relativa, ángulo de fricción, entre otros), es necesario realizar ensayos con arenas de relaves chilenos, con especial atención en los depósitos abandonados, ya que pueden tener características diferentes a las arenas de relaves más recientes. En este sentido, la aplicación del Penetrómetro PANDA pareciera ser más adecuada por su estudio y aplicación en depósitos de relaves abandonados en Chile.

Ensayo de penetración estándar (SPT)

El ensayo de penetración estándar (SPT por sus siglas en inglés) es una prueba de penetración dinámica, que se realiza en el fondo de sondajes o directamente en el suelo. Se encuentra descrito por la norma ASTM D1586 y en Chile está normado por la NCh3364:2014.

Consiste en un martillo que golpea una cuchara estandarizada, contando el número de golpes ejecutados para introducirla hasta cierta profundidad. Además, permite la obtención de una muestra alterada, la cual puede ser utilizada para determinar el contenido de humedad y para identificar y clasificar el suelo.

Las muestras que quedan al interior de la cuchara normalizada del SPT son las que se someten a posteriores ensayos de laboratorio. Estas muestras suelen ser muy alteradas, es decir, sólo conservan algunas propiedades del terreno natural. Esta recuperación solo es posible en suelos cohesivos no muy firmes y suelos granulares sin gravas no muy densas y con algunos finos.

El ensayo tiene ciertas limitantes, para arenas su funcionamiento es óptimo, pues existen correlaciones entre los resultados del ensayo y la densidad relativa, el ángulo de fricción y el potencial de licuación, pero para suelos finos, no existen estas correlaciones pues se tiene mucha dispersión, es por esto que los resultados deben usarse con cautela (DOP, 2013). Se debe tener especial cuidado al aplicar estas relaciones ya que son aproximaciones y se debe notar, al igual que en el DCP y Penetrómetro PANDA, que es necesario calibrar estas correlaciones con relaves de depósitos abandonados en Chile.

Ensayo de Permeabilidad Lefranc

El ensayo de permeabilidad Lefranc es un ensayo in situ ampliamente usado para determinar la permeabilidad en terreno de suelos en el interior de sondajes, ya sea durante la ejecución del mismo o una vez finalizada la perforación (Torres, 2009).

Existen dos procedimientos de ejecución de este ensayo: a carga hidráulica constante, donde se mantiene un nivel de agua constante en el interior del sondaje, y a carga hidráulica variable, donde se mide la velocidad de descenso del nivel de agua en el interior del sondaje. Ambos aparecen esquematizados en la Figura 0.3 (Torres, 2009).

Para el ensayo a carga hidráulica constante, se debe primero saturar el suelo hasta que el aire de los vacíos sea expulsado. Luego, se introduce o bombea agua en la cavidad fija el caudal necesario para mantener el nivel de agua constante en el sondaje. Cuando se estabiliza este proceso, con el caudal introducido, la longitud y el diámetro de la perforación, es posible calcular la permeabilidad del suelo (Torres, 2009).

Por su parte, el ensayo a carga hidráulica variable se introduce o bombea súbitamente un determinado nivel de agua en la cavidad de infiltración y se mide la variación del nivel piezométrico en el pozo a lo largo del tiempo. Con la medición del tiempo de descenso en un determinado lapso temporal, se obtiene la permeabilidad. Este tipo de ensayos es, en general, utilizado para suelos poco permeables (Torres, 2009).

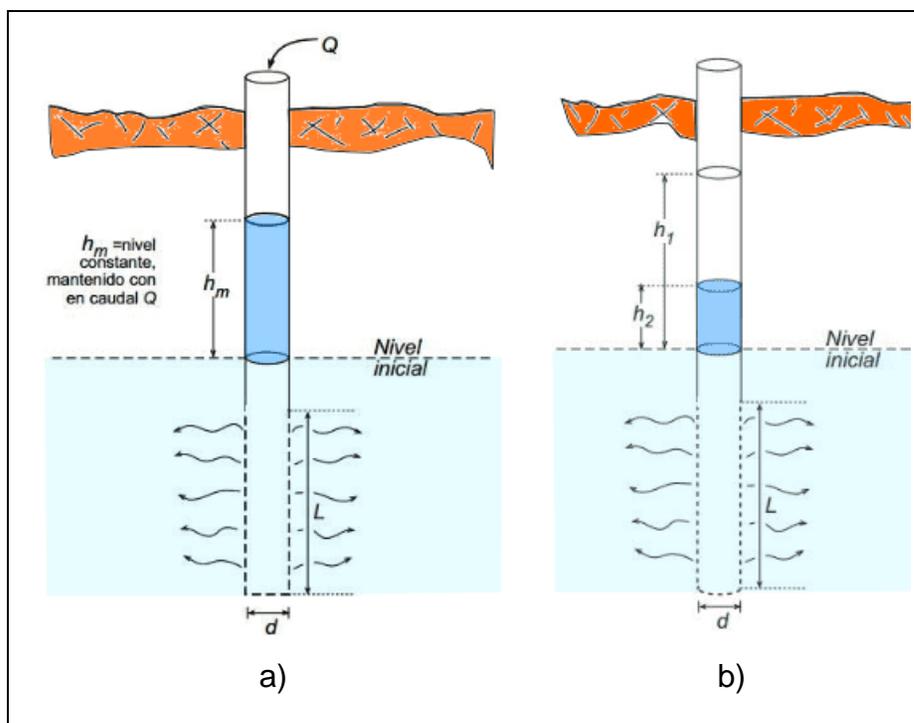


Figura 0.3 Ensayos de permeabilidad Lefranc a) carga hidráulica constante y b) carga hidráulica variable (GeologiaWeb)

Inspección visual de depósitos de relaves

La revisión en terreno representa una importante herramienta para el monitoreo de depósitos de relaves abandonados. Esta inspección debe ser justificada, por lo que la aplicación del formulario propuesto más adelante se reserva para la visita correspondiente con la *Etapa 4* y los respectivos monitoreos continuos en la *Etapa 5*.

En Chile, una vez en operación, el control de los depósitos de relaves se debe reportar a las autoridades a través del formulario E-700. En el caso de los depósitos activos, esta información debe ser enviada a la Oficina de Depósitos de Relaves del SERNAGEOMIN.

El formulario consiste en un informe trimestral sobre el monitoreo de parámetros, la medición de ellos, informes sobre los trabajos de mantenimiento, control de instrumentos existentes o la instalación de nuevos instrumentos o trabajos de operación, entre otros (Fundación Chile, 2018b). El informe se encuentra disponible en el sitio web del SERNAGEOMIN.

A continuación, se resumen algunos puntos evaluados en él que se consideran relevantes para los depósitos de relaves abandonados:

- Sección I. Identificación de faena minera: nombre faena y ubicación, nombre del depósito, tipo de depósito (tranque o embalse).
- Sección II. Informe técnico depósito de relave: método constructivo, altura del muro o depósito, largo y ancho del coronamiento, revancha sector operacional, área ocupada, ángulo del talud interno y externo del muro, densidades y

granulometría de las arenas del muro, granulometría del relave total, cota del nivel piezométrico.

- Sección III. Información anexa: información de controles y estadísticas sobre monitoreos especializados si se dispone de los equipos: Acelerógrafos, celdas de asentamientos, placas de corrimiento y nivelación, inclinómetros, otros.

Otro documento que entrega una ficha de registro es la “Guía metodológica para evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remanentes”, la cual recopila los requisitos técnicos para evaluación de estabilidad física en depósitos de relaves. Este documento se destina para “identificar y caracterizar el depósito de residuos masivos a evaluar”, el que “debe contar con información técnica del proyecto de ingeniería, con sus modificaciones y los informes de construcción y planos “as built”, construidos y aprobados por todas las autoridades competentes” (SERNAGEOMIN, 2018b). Este informe y la respectiva ficha, se encuentran en el sitio web del SERNAGEOMIN. A continuación, se presentan los antecedentes relevantes para los depósitos de relaves abandonados:

- Sección I. Identificación de la faena minera: nombre y dirección de la faena, ubicación geográfica de la faena y depósito (norte y este (UTM), cota), nombre del profesional responsable.
- Sección II. Ficha técnica depósito de relave: tipo de depósito, configuración geométrica (altura mínima y máxima, pendiente global aguas abajo, revancha), calidad del relave (porcentaje de finos, límites de Atterberg)*, grado de compactación del muro*. Suelo de fundación: topografía, pendiente, antecedentes geológicos, antecedentes hidrogeológicos, sondajes geotécnicos*. Nivel freático tanto en suelo de fundación como muro: presencia y monitoreo* del nivel. Antecedentes climatológicos e hidrológicos: estudio* y tipo de precipitaciones. Evaluación sismicidad para la condición de cierre: estudio sísmico específico del sector de emplazamiento* y regionalización sísmica. Instrumentos y monitoreos*: piezómetros en muro y suelo de fundación, presiones de poro, sistema de drenaje, acelerómetros, inclinómetros. Obras para el manejo de crecidas y/o eventos pluviométrico extremos*. Otra información: presencia de sitios poblados y habitantes aguas abajo del depósito (Censo), distancia peligrosa [* indica la necesidad de adjuntar documentos de ensayos, registros, especificaciones técnicas, proyecto de obras o cualquier otro documento relacionado con el antecedente mencionado].

Observando lo solicitado en estos dos formularios y tomando en consideración lo expuesto en este trabajo, la inspección visual en terreno de un depósito de relaves debe consistir en, al menos, lo expuesto en la Tabla 0.1 a continuación.

Tabla 0.1 Formulario de Inspección Visual de Depósito de Relaves Abandonado

Sección	Aspectos
Identificación del depósito	ID SERNAGEOMIN Nombre de faena Nombre de depósito Ubicación de depósito
Descripción del depósito	Tipo (tranque o embalse) Método constructivo (aguar arriba, aguas abajo, eje central, sin información, no aplica)
Dimensiones	Forma aproximada en planta de depósito y dimensiones (largo y ancho) Altura mínima y máxima Largo de coronamiento Ancho de coronamiento Pendiente talud aguas abajo Altura de revancha
Indicadores en muro, cubeta y estribos Presencia de:	Flujo Humedad Deslizamientos Subsidencias Grietas Erosión Flora Singularidades
Características del entorno	Topografía aproximada Pendiente de zona de emplazamiento Observaciones sobre geología y cursos de agua. Incluir distancias. Presencia de sitios poblados y habitantes aguas abajo o cercanías de depósito. Incluir distancias.
Medición y mantención de instrumentos	Revisar estado de instrumentos Cambio de baterías Registro de mediciones en el caso de ser necesario