



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

**PROPUESTA DE MONITOREO GEOTÉCNICO AVANZADO PARA  
DEPÓSITOS DE RELAVES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

VALENTINA IGNACIA CERDA SALAZAR

PROFESOR GUÍA:  
ROBERTO GESCHE SCHÜLER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
CÉSAR PASTÉN PUCHI  
GONZALO CORRAL JOFRÉ

SANTIAGO DE CHILE  
2022

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE:** Ingeniera Civil con mención en  
Estructuras, Construcción y Geotecnia  
**POR:** Valentina Ignacia Cerda Salazar  
**FECHA:** 2022  
**PROFESOR GUÍA:** Roberto Gesche Schüler

## **PROPUESTA DE MONITOREO GEOTÉCNICO AVANZADO PARA DEPÓSITOS DE RELAVES**

El presente trabajo de título tiene como principal objetivo proponer una metodología de instrumentación y monitoreo geotécnico de depósitos de relaves, donde se combinen métodos tradicionales (invasivos) y modernos (semi invasivos y no invasivos), que permita monitorear las diversas variables de control para los modos de falla de manera efectiva y confiable.

Primero, se realiza una revisión bibliográfica donde se presentan las definiciones básicas relacionadas a los depósitos de relaves, sus métodos constructivos, sus modos de fallas, las variables geotécnicas a monitorear, los métodos invasivos, semi invasivos y no invasivos utilizados para monitorear estas variables. Posteriormente, se revisa el estado de la práctica según la literatura tanto nacional como internacional.

Luego, se realizan clasificaciones por atributos y limitaciones de los métodos invasivos, semi invasivos y no invasivos para el monitoreo de variables geotécnicas en los depósitos de relaves, con el objetivo de identificar aquellos instrumentos que puedan ser un aporte a la metodología de monitoreo que se desarrolla en el presente trabajo.

Posteriormente, se estudia el estado de la práctica de la instrumentación geotécnica en depósitos de relaves chilenos, para entender cómo se monitorean estas obras en la actualidad y así poder identificar aquellas variables geotécnicas que pueden medirse mediante otros métodos más sofisticados y/o eficientes. Para esto, se recolecta información de 22 depósitos de relaves que representan al 83% del volumen de relaves total autorizado en Chile. Además, se realizan reuniones con especialistas del área para conocer su perspectiva de los sistemas de instrumentación actual y sus posibles mejoras.

Conociendo el estado de la práctica, se realiza un análisis crítico de cada una de las variables monitoreadas por los sistemas de instrumentación con el fin de conocer sus atributos y deficiencias. Este análisis se realiza con la información recolectada anteriormente.

Finalmente, se propone una metodología de instrumentación geotécnica que incorpora tanto el sistema de instrumentación como la utilización de una plataforma de monitoreo para depósitos de relaves. Mediante esta metodología se espera conocer de forma eficiente y confiable el estado del depósito, con el fin de tomar mejores decisiones respecto a su operación y/o actividades de peraltamiento.

# Agradecimientos

A mi familia, por todo el apoyo que me brindaron durante estos años. A mi papá, por motivarme a estudiar en la Universidad de Chile pese a estar lejos de la familia y a mi mamá, por apoyarme cuando más lo necesitaba para seguir adelante.

A mis amigas de la vida, Vale, Javi y Sheila, por siempre hacerse un tiempo para nuestras juntas improvisadas.

Al Profesor Roberto Gesche, por apoyarme durante el proceso de la memoria y a los miembros de la comisión, al profesor Cesar Pastén y Gonzalo Corral por estar dispuestos a responder cada una de mis dudas. A Igor Bravo, por su disposición a colaborar en esta memoria.

A la profe Yolanda, que me dió la oportunidad de ser auxiliar y ayudante en sus cursos geotécnicos.

Al Diego, muchas gracias por tu apoyo y amor incondicional durante este proceso.

Al Caste, la Marce, la Javi, la Coni Navarro y la Coni Olea y a todas aquellas personas con que compartí durante mi estadía en Beauchef.

# Tabla de Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo general .....	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	2
1.2	Estructura del trabajo.....	2
2	Marco Teórico .....	3
2.1	Relave y depósitos de relaves.....	3
2.2	Tipos de depósitos de relaves .....	4
2.3	Métodos constructivos.....	5
2.3.1	Método de aguas arriba.....	5
2.3.2	Método de aguas abajo .....	6
2.3.3	Método de eje central .....	6
2.4	Modos de falla .....	7
2.4.1	Licuación sísmica .....	7
2.4.2	Inestabilidad de taludes .....	8
2.4.3	Rebalse .....	9
2.4.4	Erosión interna.....	9
2.4.5	Capacidad de soporte.....	12
2.5	Variables geotécnicas .....	14
2.5.1	Nivel freático .....	16
2.5.2	Presiones de poros .....	16
2.5.3	Filtraciones .....	16
2.5.4	Deformaciones.....	16
2.5.4.1	Deformaciones horizontales .....	16
2.5.4.2	Asentamientos .....	17
2.5.4.3	Deformaciones sísmicas .....	17
2.5.5	Aceleraciones sísmicas .....	17
2.5.6	Esfuerzos totales .....	17
2.5.7	Revancha .....	17
2.5.8	Caudal.....	18
2.5.9	Distancia a la laguna de aguas claras.....	18
2.5.10	Volumen de agua en la laguna.....	18
2.6	Otras variables .....	18
2.6.1	Condiciones climáticas .....	18
2.7	Métodos y técnicas utilizadas para el monitoreo de variables geotécnicas.....	18
2.7.1	Métodos invasivos .....	19
2.7.1.1	Piezómetro .....	20
2.7.1.2	Inclinómetro .....	22
2.7.1.3	Extensómetro de varilla .....	24
2.7.1.4	Clinoextensómetro.....	25
2.7.1.5	Limnómetro .....	25
2.7.1.6	Celdas de asentamientos de cuerda vibrante .....	26
2.7.1.7	Celda de presión .....	27
2.7.1.8	Aforador de caudal .....	27

2.7.1.9	Acelerómetro .....	27
2.7.1.10	GPS/GNSS .....	28
2.7.1.11	Prisma de control topográfico .....	29
2.7.2	Métodos semi invasivos .....	29
2.7.2.1	Levantamiento batimétrico .....	30
2.7.2.2	Radar de estabilidad de taludes (SSR).....	30
2.7.2.3	Escáner láser .....	32
2.7.2.4	Estación total automática.....	32
2.7.2.5	Tomografía de resistividad eléctrica (ERT) .....	33
2.7.2.6	Estación meteorológica automática .....	34
2.7.3	Métodos no invasivos .....	35
2.7.3.1	Light detection and ranging (LiDAR) .....	35
2.7.3.2	Sistema de radar de apertura sintética interferométrica (InSAR).....	36
2.7.3.3	Fotogrametría .....	36
2.7.3.4	Imágenes hiperespectrales (HSI) .....	37
2.7.3.5	Imágenes térmicas .....	37
2.8	Sistemas de información.....	37
2.9	Estado de la práctica según la literatura de los sistemas de monitoreo geotécnico en depósitos de relaves .....	38
2.9.1	Literatura internacional.....	38
2.9.2	Literatura chilena.....	40
3	Clasificación por Ventajas y Limitaciones de los Métodos y Técnicas de Monitoreo Geotécnico en Depósitos de Relaves.....	41
3.1	Métodos invasivos .....	41
3.1.1	Nivel freático y presiones de poros .....	41
3.1.2	Filtraciones .....	43
3.1.3	Deformaciones.....	43
3.1.4	Esfuerzos totales .....	46
3.1.5	Aceleraciones sísmicas .....	47
3.1.6	Revancha .....	47
3.2	Métodos semi invasivos .....	48
3.2.1	Volumen de agua en la laguna.....	48
3.2.2	Deformaciones.....	49
3.2.3	Filtraciones .....	51
3.2.4	Condiciones climáticas .....	52
3.3	Métodos no invasivos .....	52
3.3.1	Deformaciones.....	52
3.3.2	Otros .....	55
4	Estado de la Práctica Respecto a la Instrumentación y Monitoreo en Depósitos de Relaves Chilenos.....	56
4.1	Normativa chilena.....	56
4.1.1	Decreto supremo N°248 .....	56
4.1.2	Decreto supremo N°35 .....	58
4.2	Programa Tranque .....	64
4.3	Catastro de instrumentación en depósitos de relaves chilenos .....	67
4.3.1	Depósito de Arenas, Caserones .....	67
4.3.2	Depósito de Relaves Espesados Minera Centinela.....	68
4.3.3	Depósito de Relaves El Trigo.....	69

4.3.4	Depósito de Relaves Los Corralillos .....	70
4.3.5	Depósito de Relaves Los Diques .....	71
4.3.6	Depósito de Relaves Pampa Pabellón .....	71
4.3.7	Depósito de Relaves Sierra Gorda.....	72
4.3.8	Depósito de Relaves Zaldívar.....	73
4.3.9	Embalse Carén.....	74
4.3.10	Embalse de Lamas, Caserones .....	75
4.3.11	Embalse de Relaves Altonorte.....	76
4.3.12	Embalse de Relaves Carmen de Andacollo.....	77
4.3.13	Embalse de Relaves Salar de Talabre.....	78
4.3.14	Tranques de Relaves Barahona 1 y 2.....	79
4.3.15	Tranque de Relaves El Mauro .....	80
4.3.16	Tranque de Relaves El Torito.....	80
4.3.17	Tranque de Relaves Las Tórtolas .....	81
4.3.18	Tranque de Relaves Los Quillayes .....	83
4.3.19	Tranque de Relaves Laguna Seca.....	84
4.3.20	Tranque de Relaves Ovejería.....	85
4.3.21	Tranque de Relaves Pampa Austral.....	86
4.4	Estado de la práctica de los sistemas de monitoreo geotécnico y perspectiva hacia el futuro 87	
5	Análisis Crítico de Sistemas de Instrumentación y Monitoreo en la Actualidad .....	89
5.1	Variables geotécnicas .....	90
5.1.1	Nivel freático y presiones de poros. ....	90
5.1.2	Filtraciones .....	92
5.1.3	Deformaciones.....	93
5.1.4	Aceleraciones sísmicas .....	96
5.1.5	Esfuerzos totales .....	97
5.1.6	Condiciones climáticas .....	97
5.1.7	Revancha .....	97
5.1.8	Caudal.....	98
5.1.9	Distancia a la laguna de aguas claras.....	98
5.1.10	Volumen de agua en la laguna.....	99
6	Propuesta Metodológica Avanzada de Instrumentación y Monitoreo de Depósitos de Relaves .....	101
6.1	Monitoreo de nivel freático y presiones de poros .....	101
6.2	Monitoreo de filtraciones.....	102
6.3	Monitoreo de deformaciones.....	104
6.4	Monitoreo de aceleraciones sísmicas .....	106
6.5	Monitoreo de esfuerzos totales.....	107
6.6	Monitoreo de las condiciones climáticas.....	107
6.7	Monitoreo de revancha .....	107
6.8	Monitoreo de caudal .....	108
6.9	Monitoreo de la distancia a la laguna de aguas claras.....	108
6.10	Volumen de agua en la laguna.....	108
6.11	Plataforma de monitoreo .....	109
7	Conclusiones.....	110
7.1	Recomendaciones .....	111
8	Bibliografía.....	112

# Índice de Tablas

Tabla 1: Instrumentos invasivos a utilizar para medir las variables de control según los distintos mecanismos de falla. Elaboración propia. ....	20
Tabla 2: Métodos semi invasivos a utilizar para medir las variables de control según los distintos mecanismos de falla.....	29
Tabla 3: Métodos no invasivos a utilizar para medir las variables de control según los distintos mecanismos de falla.....	35
Tabla 4: Tabla de ventajas y limitaciones de piezómetros. ....	42
Tabla 5: Tabla de ventajas y limitaciones medidores de caudal.....	43
Tabla 6: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentos utilizados principalmente para monitorear deformaciones horizontales. ....	44
Tabla 7: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentos utilizados principalmente para monitorear deformaciones verticales.....	45
Tabla 8: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentos utilizados principalmente para monitorear deformaciones internas (verticales y horizontales).....	45
Tabla 9: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentos utilizados principalmente para monitorear deformaciones superficiales puntuales. ....	46
Tabla 10: Tabla de ventajas y limitaciones de la Celda de presión.....	46
Tabla 11: Tabla de ventajas y limitaciones del Acelerómetro.....	47
Tabla 12: Tabla de ventajas y limitaciones del Limnómetro. ....	47
Tabla 13: Tabla de ventajas y limitaciones del bote no tripulado en comparación al bote tripulado .....	48
Tabla 14: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentación para el monitoreo de deformaciones. ....	49
Tabla 15: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentación para el monitoreo de deformaciones. ....	50
Tabla 16: Tabla de ventajas y limitaciones de la Tomografía de resistividad eléctrica (ERT).....	51
Tabla 17: Tabla de ventajas y limitaciones de la Estación Meteorológica Automática.....	52
Tabla 18: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentación utilizada para el monitoreo de deformaciones.....	53
Tabla 19: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentación utilizada para el monitoreo de deformaciones.....	54
Tabla 20: Tabla de ventajas y limitaciones de métodos a través de la toma de imágenes. ....	55
Tabla 21: Clasificación por Tipo de Depósito de Relaves. ....	59
Tabla 22: Nivel de Consecuencias del Proyecto de Depósitos de Relaves, Decreto Supremo N°35, 2022. ....	60
Tabla 23: Clasificación por Categoría de Depósito de Relaves según Nivel de Consecuencias y Clasificación por Envergadura del Depósito de Relaves, Decreto Supremo N°35, 2022. ....	61
Tabla 24: Estado del arte de la instrumentación geotécnica invasiva en depósitos de relaves. (Modificado de AMTC, 2018).....	65
Tabla 25: Estado del arte de la instrumentación geotécnica semi invasiva en depósitos de relaves (Modificado de AMTC, 2018).....	66

Tabla 26: Estado del arte de la instrumentación geotécnica no invasiva en depósitos de relaves (Modificado de AMTC, 2018).....	66
Tabla 27: Principales características del Depósito de Arenas, Quebrada Caserones. ....	67
Tabla 28: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de Arenas. ....	68
Tabla 29: Principales características del Depósito de relaves Espesados Minera Centinela.....	68
Tabla 30: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de relaves Espesados Minera Centinela.....	69
Tabla 31: Principales características del Depósito de relaves El Trigo.....	69
Tabla 32: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de relaves El Trigo. ....	70
Tabla 33: Principales características del Depósito de relaves Los corralillos.....	70
Tabla 34: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de relaves Los Corralillos. ....	70
Tabla 35: Principales características del Depósito de relaves Los Diques.....	71
Tabla 36: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de relaves Los Diques.....	71
Tabla 37: Principales características del Depósito de relaves Pampa Pabellón. ....	72
Tabla 38: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de relaves Pampa Pabellón. ....	72
Tabla 39: Principales características del Depósito de relaves Sierra Gorda.....	73
Tabla 40: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de relaves Sierra Gorda.....	73
Tabla 41: Principales características del Depósito de relaves Zaldívar.....	74
Tabla 42: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de relaves Zaldívar.....	74
Tabla 43: Principales características del Embalse Carén. ....	74
Tabla 44: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Embalse Carén. ....	75
Tabla 45: Principales características del Embalse de Lamas. ....	75
Tabla 46: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Embalse de Lamas. .	76
Tabla 47: Principales características del Embalse de relaves Altonorte. ....	76
Tabla 48: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Embalse de relaves Altonorte.....	77
Tabla 49: Principales características del Embalse de relaves Carmen de Andacollo.....	77
Tabla 50: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Embalse de relaves Carmen de Andacollo. ....	78
Tabla 51: Principales características del Embalse de relaves Salar de Talabre.....	78
Tabla 52: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Embalse de relaves Salar de Talabre. ....	79
Tabla 53: Principales características de los Tranques de relaves Barahona 1 y 2.....	79
Tabla 54: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar de los Tranques de relaves Barahona 1 y 2.....	79
Tabla 55: Principales características del Tranque de relaves El Mauro.....	80
Tabla 56: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Tranque de relaves El Mauro. ....	80
Tabla 57: Principales características del Tranque de relaves el Torito. ....	81
Tabla 58: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Tranque de relaves El Torito. ....	81
Tabla 59: Principales características del Tranque de relaves Las Tórtolas. ....	82

Tabla 60: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Tranque de relaves Las Tórtolas.....	82
Tabla 61: Principales características del Tranque de relaves Los Quillayes.....	83
Tabla 62: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Tranque de relaves Los Quillayes.....	83
Tabla 63: Principales características del Tranque de relaves Laguna Seca.....	84
Tabla 64: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Tranque de relaves Laguna Seca.....	84
Tabla 65: Principales características del Tranque de relaves Ovejería. ....	85
Tabla 66: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Tranque de relaves Ovejería. ....	85
Tabla 67: Principales características del Tranque de relaves Pampa Austral.....	86
Tabla 68: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Tranque de relaves Pampa Austral. ....	86
Tabla 69: Cantidad de depósitos que abordan las variables geotécnicas con su porcentaje. ....	90

# Índice de Figuras

Figura 1: Esquema de depósitos de relaves (Modificado de Carvajal, 2018) .....	4
Figura 2: Esquema de método de aguas arriba (Modificado de Mine Safety and Health Administration MSHA, 2010) .....	6
Figura 3: Esquema de método de aguas abajo (Modificado de Mine Safety and Health Administration MSHA, 2010) .....	6
Figura 4: Esquema de método de eje central (Modificado de Mine Safety and Health Administration MSHA, 2010) .....	7
Figura 5: Esquema de inestabilidad de talud en el muro. Elaboración propia. ....	8
Figura 6: Esquema de rebalse del muro (Modificado de Carvajal, 2018) .....	9
Figura 7: Esquema de erosión interna en el muro (Modificado de Carvajal, 2018) .....	10
Figura 8: Fases del proceso de erosión (Zhang et al., 2016). ....	10
Figura 9: Tipos de mecanismos de iniciación de erosión interna (Zhang et al., 2016). ....	11
Figura 10: Esquema ilustrativo de falla por capacidad de soporte (Modificado de Clarkson, 2021) .....	13
Figura 11: Esquema ilustrativo de falla por capacidad de soporte (Modificado de Clarkson, 2021) .....	14
Figura 12: Esquema de variables a monitorear según los distintos modos de falla. Elaboración propia. ....	15
Figura 13: Esquema de piezómetro Casagrande (Modificado de Das, 2013) .....	21
Figura 14: Esquema de piezómetro de cuerda vibrante (Modificado de Geokon, 2022) .....	22
Figura 15: Esquema ilustrativo de un sistema de inclinómetro deslizante (Modificado de Suárez, 2009) .....	23
Figura 16: Esquema ilustrativo de un sistema de inclinómetro fijo (Modificado de Geo-observations, 2022) .....	24
Figura 17: Extensómetro (Sisgeo, 2021b) .....	25
Figura 18: Esquema ilustrativo del clinoextensómetro (Modificado de Sisgeo, 2022) .....	25
Figura 19: Limnómetro (Directindustry, 2021) .....	26
Figura 20: Celda de asentamiento (Geosensor, 2021) .....	26
Figura 21: Celdas de presión con cuerda vibrante (Sisgeo, 2021a) .....	27
Figura 22: Caudalímetro de tubería (Onicon, 2021) .....	27
Figura 23: Acelerógrafo (Geoteknik, 2021). ....	28
Figura 24: GPS (Mssdefence, 2022). ....	28
Figura 25: Prima de control topográfico. (GrupoAcre, 2021) .....	29
Figura 26: Bote no tripulado. (Geosensor, 2022). ....	30
Figura 27: Radar de estabilidad de taludes con tecnología RAR (Modificado de Clarkson, 2021) .....	31
Figura 28: Radar de estabilidad de taludes con tecnología SAR (Modificado de Clarkson, 2021) .....	31
Figura 29: Esquema ilustrativo de Escáner láser. Elaboración propia. ....	32
Figura 30: Esquema de estación total automática en depósitos de relaves. Elaboración propia. ..	33
Figura 31: Esquema del arreglo en la tomografía de resistividad eléctrica. Elaboración propia. .	34
Figura 32: Estación meteorológica. (Darrera, 2022) .....	35
Figura 33: Esquema ilustrativo del satélite. Elaboración propia. ....	36
Figura 34: Espectro de ondas electromagnéticas (Araya et al, 2019) .....	37

Figura 35: Distribución del estado de Depósitos de relaves en Chile. ....	89
Figura 36: Porcentaje de depósitos que tienen instalados diversos métodos de monitoreos del nivel freático y/o las presiones de poros.....	91
Figura 37: Cantidad de tipos de instrumentación de monitoreo de nivel freático y/o presiones de poros. ....	92
Figura 38: Porcentaje de depósitos que declara monitorear las filtraciones.....	93
Figura 39: Gráfico con el porcentaje de depósitos que tiene instalado diversos tipos de instrumentación para el monitoreo de deformaciones.....	94
Figura 40: Cantidad de tipos de instrumentación de monitoreo de deformaciones.....	95
Figura 41: Porcentaje de depósitos que monitorea los diferentes tipos de deformaciones. ....	96
Figura 42: a) Porcentaje de depósitos de relaves que poseen acelerómetros. b) Distribución de la cantidad de acelerómetros. ....	97
Figura 43: Distribución de depósitos que monitorean caudal. ....	98
Figura 44: Distribución de monitoreo de distancia a la laguna de aguas claras. ....	99
Figura 45: Distribución del monitoreo del volumen de agua en la laguna.....	100
Figura 46: Esquema conceptual propuesto de monitoreo de nivel freático, presiones de poros y filtraciones. Elaboración propia.....	103
Figura 47: Esquema conceptual propuesto de monitoreo de deformaciones. Elaboración propia. ....	105

# 1 Introducción

Chile es conocido mundialmente por ser un país minero, esto debido al gran porcentaje de cobre extraído en el país. Se estima que durante el 2020 la producción de cobre fue de 5,77 millones de Toneladas Métricas, correspondiente al 28% de la producción mundial. Este nivel de producción permitió al país posicionarse como el país con más producción de cobre a nivel mundial. Sin embargo, Chile no sólo se destaca por la producción de cobre, sino que además genera gran parte de la extracción del Molibdeno, donde, pese que la producción es considerablemente menor en comparación a la del cobre (59.319 Toneladas Métricas) Chile sigue manteniéndose en la cúspide del ranking mundial ubicándose en segundo lugar. (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2021b)

Una gran extracción de minerales conlleva consigo un alto nivel de residuos, los cuales se almacenan en depósitos de relaves. Estas grandes estructuras no están ajenas a fallas, más aún en un país sísmico como Chile. Debido a esto, se genera la necesidad de realizar constante monitoreo sobre estos depósitos, pues la falla de una estructura de tamaño envergadura no solo puede producir una catástrofe medioambiental, sino que además puede poner en riesgo la vida de trabajadores y habitantes de la zona en que se ubican.

Hoy en día, el monitoreo de los depósitos de relaves está normado por el Decreto Supremo N°248, donde, pese a que se menciona la obligatoriedad de monitorear estas estructuras y sus variables geotécnicas, no se indican los instrumentos a utilizar ni las zonas estratégicas donde ubicarlos.

Tradicionalmente, para monitorear el desempeño geotécnico de un depósito se han utilizado instrumentos invasivos, de los cuales, algunos requieren obtener los datos manualmente (aumentando así la posibilidad de errores), poseen una cobertura espacial limitada, alteran el entorno y en caso de instalarse incorrectamente es posible tener un monitoreo deficiente. Sin embargo, con el avance tecnológico producido durante estos últimos años, es posible monitorear los depósitos de forma rápida y precisa en zonas de mayor extensión mediante nuevos instrumentos semi invasivos y no invasivos, creados con otros fines (principalmente militares) pero que pueden aportar enormemente al ámbito geotécnico. Lo anterior, acompañado de plataformas de monitoreo para la visualización y análisis de los datos, permiten generar sistemas de monitoreo completos y complejos capaces de predecir el desarrollo de los modos de falla.

El presente trabajo de título tiene como principal objetivo proponer una metodología de instrumentación y monitoreo geotécnico avanzado para depósitos de relaves que incorpore instrumentos invasivos (tradicionales), semi invasivos y no invasivos (modernos) de tal manera de controlar las variables geotécnicas de forma rápida y precisa. Con esta metodología, se espera disminuir la posibilidad de falla del muro, protegiendo así la vida de los trabajadores y el medio ambiente. Además, se espera tener una menor cantidad de trabajadores en el depósito y una menor cantidad de viajes a terreno, disminuyendo los costos asociados a estos.

## **1.1 Objetivos**

En esta sección se presentan los objetivos del presente trabajo de título.

### **1.1.1 Objetivo general**

El trabajo de título tiene como principal objetivo desarrollar una propuesta metodológica de instrumentación y monitoreo geotécnico avanzado de depósitos de relaves, donde se combinen sistemas invasivos, semi invasivos y no invasivos incorporando instrumentos con nuevas tecnologías que sean un aporte para el área.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Revisión bibliográfica de las principales características de los depósitos de relaves, los tipos de depósitos existentes, sus métodos constructivos, sus modos de fallas y las variables geotécnicas a monitorear.
- Revisión de los métodos invasivos (tradicionales), semi invasivos y no invasivos (remote sensing) generando clasificaciones por ventajas y limitaciones.
- Revisión del estado de la práctica de la instrumentación geotécnica en depósitos de relaves chilenos.
- Realizar un análisis crítico de los sistemas de instrumentación y monitoreo geotécnicos actuales en los depósitos de relaves chilenos.

## **1.2 Estructura del trabajo**

Este trabajo de título se estructura en 9 capítulos que incluye la introducción. El capítulo 2 consta de la revisión bibliográfica, donde se presentan las definiciones básicas relacionadas a depósitos de relaves, los tipos de depósitos existentes, sus métodos constructivos, sus modos de fallas, las variables geotécnicas a monitorear y finalmente los métodos invasivos, semi invasivos y no invasivos utilizados para monitorear estas variables geotécnicas. El capítulo 3 presenta las clasificaciones por atributos y limitaciones de los métodos utilizados para el monitoreo de variables geotécnicas en los depósitos de relaves. En el capítulo 4 se revisa el estado de la práctica de la instrumentación geotécnica en relaves. El capítulo 5 consta de un análisis crítico de los sistemas de instrumentación y monitoreo geotécnico actuales en los depósitos de relaves chilenos. El capítulo 6 presenta la propuesta metodológica de instrumentación y monitoreo de depósitos de relaves para luego concluir y entregar recomendaciones en los capítulos 7 y 8 respectivamente. Finalmente, en el capítulo 9 se muestra la bibliografía.

## 2 Marco Teórico

En primera instancia, se realiza una revisión general de la bibliografía asociada a los depósitos de relaves con la finalidad de familiarizarse con la terminología y tener los conocimientos necesarios para generar una propuesta metodológica de instrumentación y monitoreo de depósitos.

### 2.1 Relave y depósitos de relaves

El relave es el material triturado sobrante que se obtiene durante el proceso de extracción de minerales de gran valor económico. Se define como la 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. Corresponde también a la fracción sólida de la pulpa. (Decreto N°248, 2007).

Este material se almacena en depósitos de relaves, los cuales se definen como toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una Planta de concentración húmeda de especies de minerales. Su función principal es la de servir como depósito, generalmente, definitivo de materiales sólidos proveniente del relave transportado desde la Planta, permitiendo así la recuperación, en gran medida, del agua que transporta dichos sólidos. (Decreto N°248, 2007).

Según la página del Servicio Nacional de Geología y Minería, los depósitos de relaves poseen los siguientes elementos:

**Muro de contención o prisma resistente:** La zona periférica del depósito de relaves estructurada artificialmente, que complementa el perímetro natural para conformar la zona de la Cubeta. (Decreto N°248, 2007)

**Cubeta:** La zona del depósito de relaves en la cual se acumularán según el proceso de sedimentación los sólidos de grano más fino de los relaves, en el caso de los Tranques de Relaves, o la totalidad de los relaves, en los otros sistemas de depositación. (Decreto N°248, 2007)

**Laguna de aguas claras:** Corresponde a la laguna de clarificación que se forma en la cubeta debido a la sedimentación o decantación de las partículas sólidas (SERNAGEOMIN, 2021)

**Sistema de drenaje:** Sistema utilizado para deprimir al máximo el nivel freático en el interior del cuerpo del muro de contención. Generalmente se construye en la base del muro (Decreto N°248, 2007)

**Revancha:** La 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 N°248, 2007)

**Coronamiento:** Parte superior del prisma resistente o muro de contención. Debe tener un ancho que asegure la estabilidad del muro, el cual debe ser, como mínimo, de a lo menos 2 metros. (Decreto N°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, 2021)

**Playa activa:** Zona donde se descargan los relaves en la cubeta, se le denomina playa porque usualmente esta seca en la superficie y se asemeja a una playa de arenas finas. Es la parte del depósito de relaves o lamas situada en las cercanías de la línea de vaciado. (SERNAGEOMIN, 2021)

En la Figura 1, se presenta una imagen ilustrativa de los depósitos de relaves.

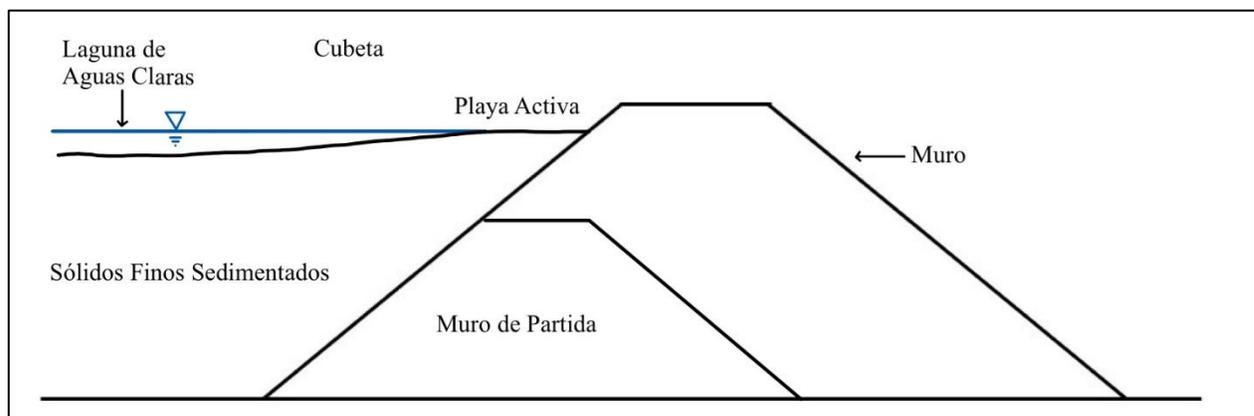


Figura 1: Esquema de depósitos de relaves (Modificado de Carvajal, 2018)

## 2.2 Tipos de depósitos de relaves

**Tranque de relaves:** Depósito de relaves donde el muro de contención se construye con la fracción gruesa del relave (arenas).

**Embalse de relaves:** Depósito de relaves donde el muro de contención está construido con empréstito (material grueso extraído de zonas cercanas al depósito) y se encuentra impermeabilizado en el coronamiento y en su talud interno. También se llaman embalses de relaves aquellos depósitos ubicados en alguna depresión del terreno en que no se requiere la construcción de un muro de contención (Decreto N°248, 2007).

**Relaves espesados:** Depósito de relaves donde, antes de ser depositados, son sometidos a un proceso de sedimentación, mediante espesadores, eliminándole una parte importante del agua que contienen. El depósito de relaves espesados deberá ser construido de tal forma que se impida que el relave fluya a otras áreas distintas a las del emplazamiento determinado y contar con un sistema de piscinas de recuperación de agua remanente (Decreto N°248, 2007).

**Relaves filtrados:** Depósitos de relaves, donde antes de ser depositados, son sometidos a un proceso de filtración permitiendo una alta recuperación del agua contenida. Se debe asegurar que el relave no fluya a otras áreas distintas al emplazamiento del depósito.

**Relaves en pasta:** Depósito de relaves que presenta una situación intermedia entre el relave espesado y el relave filtrado, corresponde a una mezcla de relaves sólidos y agua (entre 10% a 25% de agua) que contiene partículas finas, menores de 20 µm en diámetro, en una concentración en peso superior al 15%, muy similar a una pulpa de alta densidad. Su depositación se efectúa en forma similar al relave filtrado, sin necesidad de compactación (Decreto N°248, 2007).

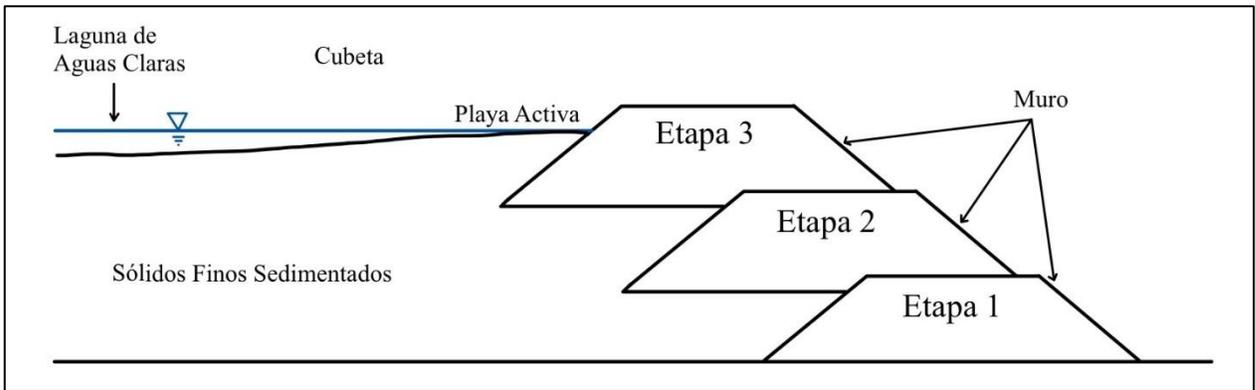
Los riesgos ambientales y económicos asociados a fallas catastróficas, sumado a una mayor recuperación de agua y menor impacto medioambiental, han llevado a la industria a cambiar gradualmente hacia la disposición espesada de relaves (Araya et al, 2019).

## **2.3 Métodos constructivos**

Existen tres métodos constructivos de depósitos de relaves, Aguas arriba, Aguas abajo, y eje central. Sin embargo, el decreto supremo N°248, prohíbe la utilización del primer método mencionado pues se considera que un muro obtenido a través de esta metodología es poco resistente frente a cargas sísmicas. A continuación, se describen los métodos constructivos:

### **2.3.1 Método de aguas arriba**

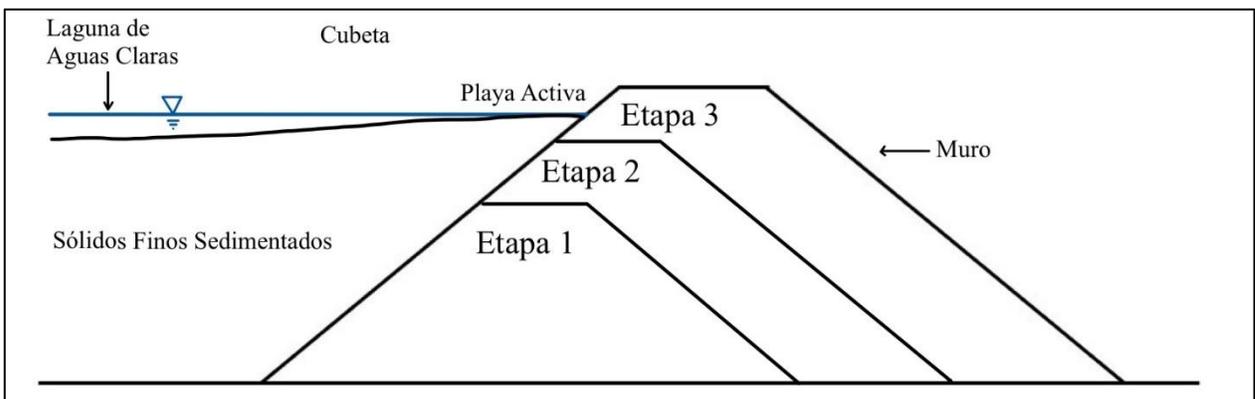
Consiste en la construcción de un muro inicial con material de empréstito compactado sobre el cual se comienza a depositar la fracción gruesa del relave hacia aguas arriba, cuando el depósito se encuentre próximo a llenarse, se construye el siguiente muro apoyándose tanto en la fracción gruesa de relaves (aguas arriba del muro) como en el muro anteriormente generado.



**Figura 2: Esquema de método de aguas arriba (Modificado de Mine Safety and Health Administration MSHA, 2010)**

### 2.3.2 Método de aguas abajo

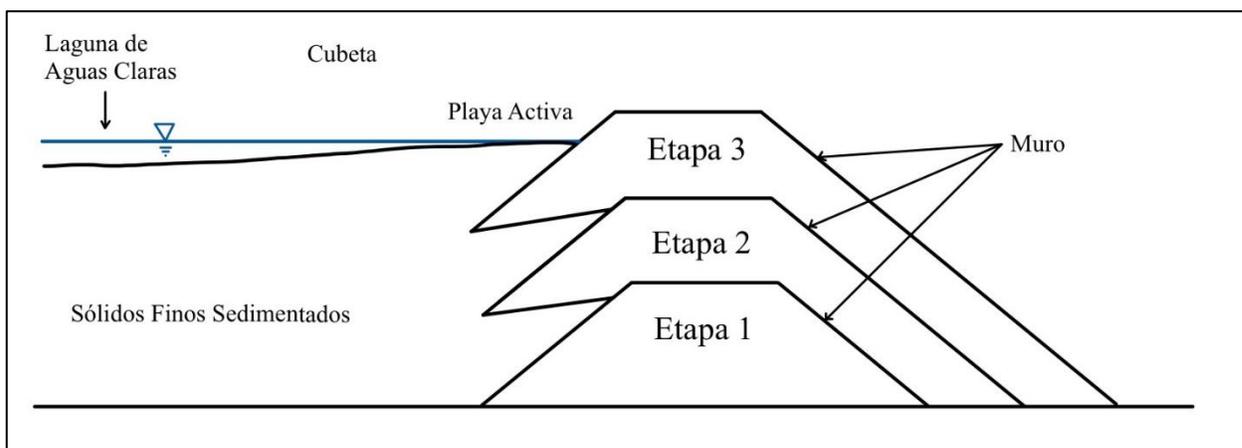
Consiste en la construcción de un muro inicial con material de empréstito compactado, cuando el depósito esté próximo a llenarse, se construye un nuevo muro sobre el muro anterior hacia aguas abajo.



**Figura 3: Esquema de método de aguas abajo (Modificado de Mine Safety and Health Administration MSHA, 2010)**

### 2.3.3 Método de eje central

Consiste en la construcción de un muro inicial con material de empréstito, cuando el depósito se encuentre próximo a llenarse, se comienza la construcción del siguiente muro manteniendo el mismo eje vertical que el muro inicial.



**Figura 4: Esquema de método de eje central (Modificado de Mine Safety and Health Administration MSHA, 2010)**

Cabe mencionar que en Chile el método más utilizado es el de aguas abajo.

## 2.4 Modos de falla

Para lograr generar una metodología de instrumentación geotécnica efectiva es fundamental comprender a cabalidad los diversos modos de fallas observados en depósitos de relaves. Los modos de falla según Clarkson (2021) son: licuación sísmica, inestabilidad de taludes, rebalse, erosión interna, capacidad de soporte y filtraciones, sin embargo, para efectos de este trabajo, se considera este último solo como una variable a monitorear. A continuación, se presentan los modos de fallas y sus principales características.

### 2.4.1 Licuación sísmica

Los tranques de relaves han demostrado ser susceptibles a la licuación sísmica, específicamente a la denominada falla de flujo. Este tipo de falla normalmente resulta de la generación de presiones de poros excesivas durante el evento sísmico, los cuales no se alcanzan a disipar suficientemente rápido generando una condición no drenada en el suelo. Debido a este aumento de exceso de presiones de poros, los esfuerzos efectivos de confinamiento disminuyen llegando a cero o cercano a cero produciendo así un esfuerzo de corte próximo a cero en relaves sin cohesión. Este tipo de falla se caracteriza principalmente por generar deformaciones excesivas en pocos minutos. Los principales factores contribuyentes a una falla por licuación sísmica en los tranques de relaves chilenos son (Villavicencio et al, 2013).

- La presencia de agua es crucial en el rápido aumento de las presiones de poros durante la aplicación de la carga sísmica. La mayoría de los depósitos estaban operativos cuando ocurrieron los terremotos y la laguna de aguas claras cerca del coronamiento del muro.
- Arena de relaves utilizada para la construcción del muro con baja densidad debido a una inadecuada compactación mecánica.

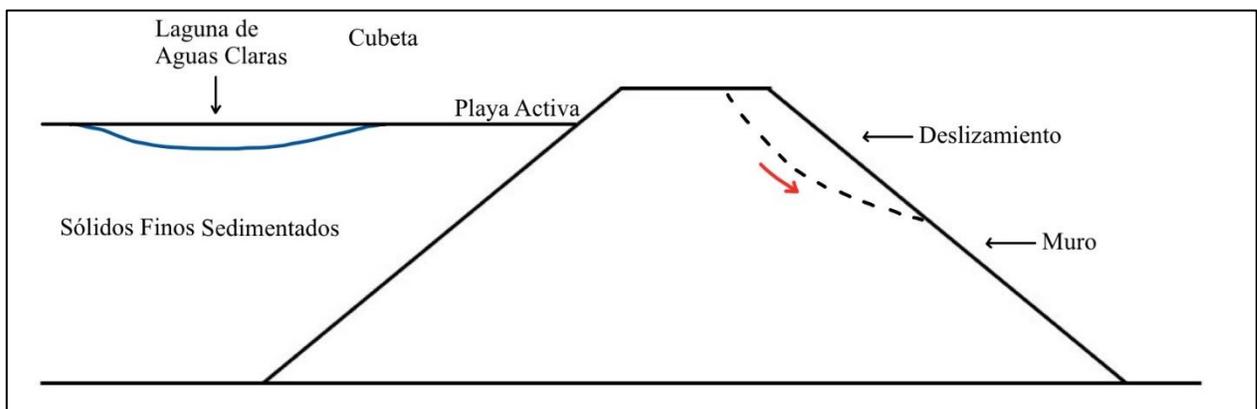
- Muros construidos utilizando arena de relaves con alto contenidos de limos. Esto principalmente a los inadecuados sistemas de depositación y ciclones utilizados que generan lentes de limos de baja resistencia al corte en el talud de aguas abajo en áreas cercanas al coronamiento del muro de contención, facilitando el desarrollo de mecanismos de falla.
- Muros construidos con el método de “Aguas Arriba”. Este método genera fallas debido a la licuación del material debajo del muro de contención (relaves limosos no consolidados y sueltos).

## 2.4.2 Inestabilidad de taludes

La falla por inestabilidad de talud se caracteriza por el deslizamiento de una parte del muro (ver Figura 5), esto puede ocurrir en condiciones estáticas o sísmicas. Depende principalmente del tipo de material del muro, de la estratificación del suelo, del nivel freático, de las filtraciones, de la geometría del muro (Budhu, 2011), y del nivel de compactación del muro. Como los depósitos de relaves se construyen por etapas, es necesario verificar constantemente la estabilidad de los taludes durante la construcción y operación del depósito.

El método de construcción de aguas abajo en condiciones estáticas, pareciera ser el método que genera muros más estables durante las etapas de construcción y operación. (Psarropoulos & Tsompanakis, 2008).

Según Clarkson (2021), el progreso de la falla por inestabilidad de taludes se puede monitorear principalmente a través de deformaciones (y asentamientos) y niveles freáticos (repentina disminución en el nivel).



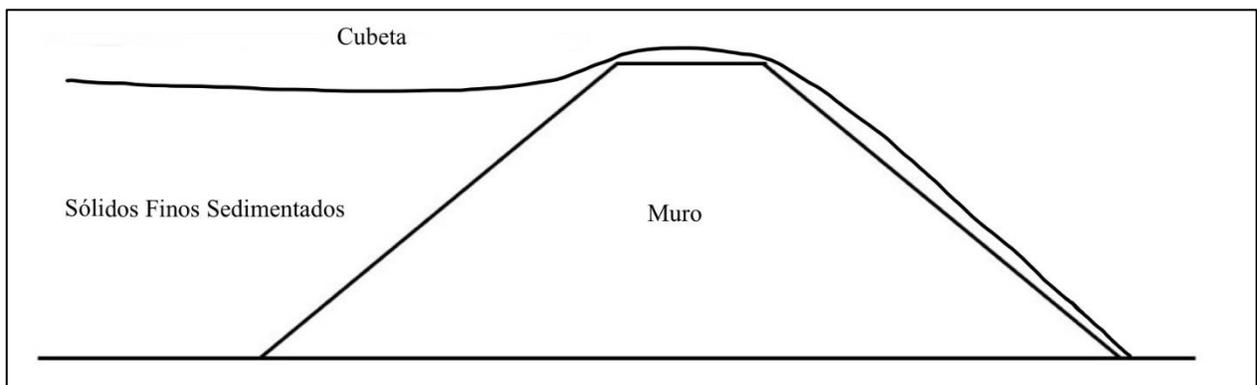
**Figura 5: Esquema de inestabilidad de talud en el muro. Elaboración propia.**

### 2.4.3 Rebalse

La falla por rebalse o overtopping se produce cuando se excede la capacidad del depósito de relaves (ver Figura 6). Esto, puede darse debido a una gran cantidad de relaves acompañado de, por ejemplo (Clarkson, 2021):

- Exceso de lluvia y/o falta de control sobre el nivel de agua en el depósito.
- Asentamientos en el coronamiento del muro, disminuyendo la revancha.
- Deslizamientos de tierras del terreno circundante, disminuyendo la capacidad de almacenamiento del depósito.
- Eventos sísmicos, los cuales pueden generar el reordenamiento de las partículas reduciendo la revancha del muro.

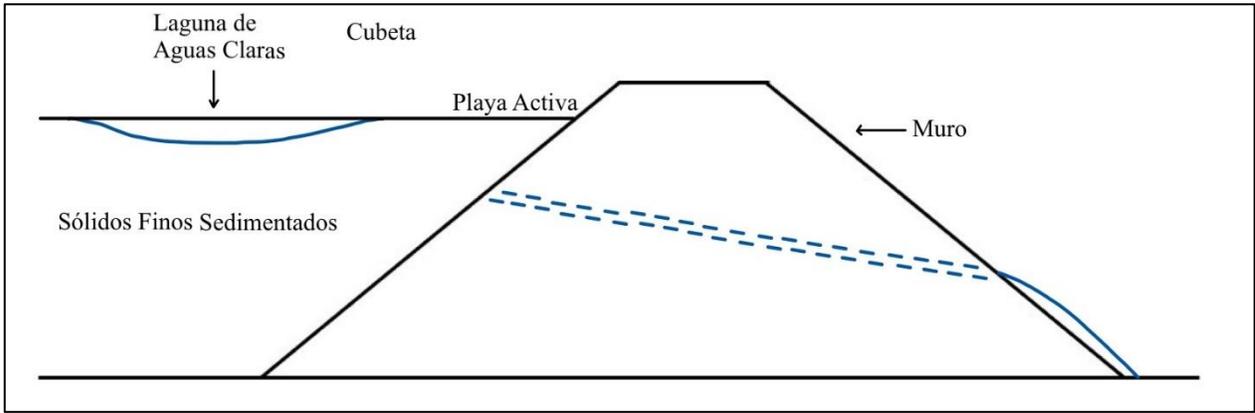
La falla por rebalse es a menudo un proceso de erosión superficial progresiva, en donde, a medida que el nivel del agua sube progresivamente, las partículas del suelo de la superficie son removidas por agua, produciendo la destrucción gradual del muro. Esta erosión superficial progresiva es característica en los suelos no cohesivos, como lo son normalmente los muros de contención de los depósitos de relaves. (Zhang et al, 2016).



**Figura 6: Esquema de rebalse del muro (Modificado de Carvajal, 2018)**

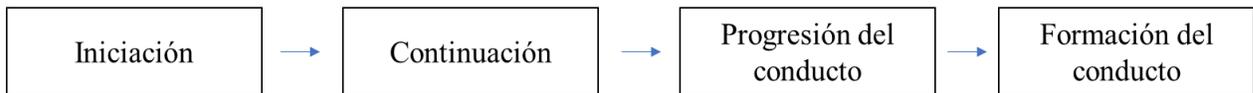
### 2.4.4 Erosión interna

La erosión interna ocurre cuando partículas de suelo son desplazadas localmente, usualmente en suspensión, por las fuerzas hidrodinámicas del agua que fluye por el muro o por la fundación, por el embalse a la fundación, o alrededor y adentro de conductos a través del embalse y las paredes que lo soportan (Zhang et al., 2016).



**Figura 7: Esquema de erosión interna en el muro (Modificado de Carvajal, 2018)**

Según Zhang et al. (2016), el proceso de erosión interna se puede dividir en cuatro fases:



**Figura 8: Fases del proceso de erosión (Zhang et al., 2016).**

Además, Zhang et al. (2016) indica que existen cuatro mecanismos de iniciación de erosión interna, los cuales son (ver Figura 9):

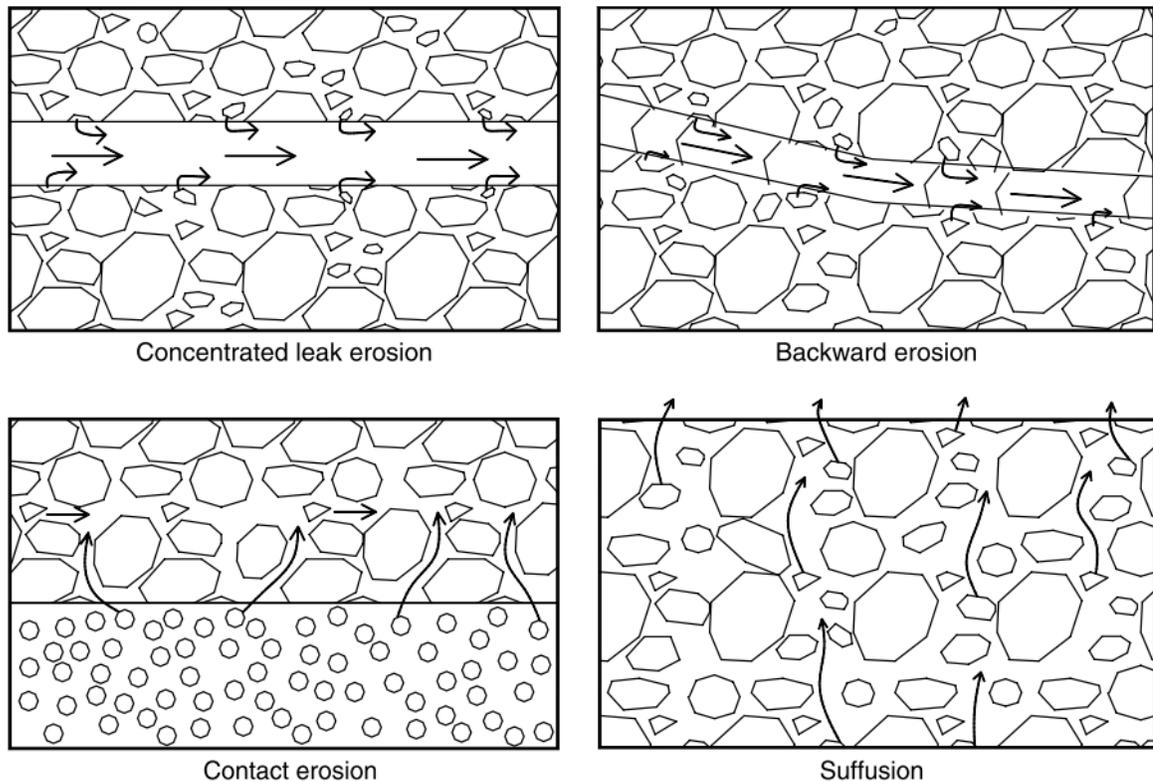
**Erosión por fuga concentrada:** Puede ocurrir en trayectorias preferenciales (es decir, por grietas de tensión) en el muro. Las grietas pueden ser causadas por asentamiento diferencial, fracturas hidráulicas en núcleos arcillosos, o desecación en vacíos adyacentes a una pared o conductos de hormigón, en una zona permeable continua que contiene materiales gruesos y/o pobremente compactados, entre otros.

**Erosión hacia atrás:** Involucra la erosión de las partículas del suelo en el extremo de salida de la trayectoria de filtración debido a la alta velocidad de salida en esa zona. Se puede dividir en dos tipos: erosión hacia atrás en forma de tubería y erosión hacia atrás global. En la primera, la salida de la trayectoria de filtración puede situarse en una superficie libre, como la superficie del suelo libre aguas debajo del suelo de fundación o aguas debajo de un muro homogéneo. Las partículas desprendidas son arrastradas por el flujo de filtración y el proceso de erosión se propaga gradualmente hacia el lado de aguas arriba, siguiendo las rutas críticas de filtración. En la segunda, la salida de la trayectoria de filtración puede situarse en la interfaz entre el núcleo de arcilla y el filtro de aguas abajo del muro. La progresión del proceso de erosión es asistida por la gravedad, y no hay necesidad de una capa de suelo cohesivo para formar el techo de la tubería.

**Erosión por contacto:** Implica la erosión selectiva de partículas finas en la interfaz de dos tipos diferentes de suelos bajo infiltración. Por un lado, si los poros formados por el estrato de suelo grueso son demasiado grandes, las partículas finas del estrato de suelo más fino pueden pasar

fácilmente por ellos debido al flujo de filtración. Por otro lado, si el estrato grueso no es lo suficientemente permeable para disipar la potencial presión de poro generada dentro del estrato, la capa gruesa no funcionará correctamente.

**Sufusión:** Implica la erosión selectiva de partículas finas dentro de una matriz de partículas gruesas del suelo. Las partículas más gruesas no se transportan y las tensiones efectivas se transfieren en gran medida a través de la matriz de las partículas más gruesas.



**Figura 9: Tipos de mecanismos de iniciación de erosión interna (Zhang et al., 2016).**

La fase de continuación de erosión se relaciona con si los filtros o la zona de transición dentro del depósito detendrán el proceso de erosión. Esta puede continuar, detenerse después de una erosión menor, detenerse después de una cantidad significativa de erosión o continuar (Fell et al.,2005).

La progresión es la fase de erosión interna donde (Fell et al.,2005):

- a) Para la erosión por fuga concentrada, la erosión en la grieta o fuga concentrada conduce al desarrollo de una tubería.
- b) Para la erosión hacia atrás, el proceso de erosión se extiende río arriba desde el punto de inicio y se forma una red de pequeños canales de erosión debajo del suelo o del muro que proporciona el techo a las tuberías de erosión.

- c) Para la erosión por contacto, continúa la erosión del suelo más fino hacia el suelo más grueso o hacia defectos abiertos en una masa rocosa.
- d) Por sufusión, parte de la fracción más fina se erosiona dejando la matriz más gruesa del suelo. No se forma tubería, pero la permeabilidad del suelo puede incrementarse significativamente.

El potencial de erosión interna dentro de un muro depende tanto de la violencia del flujo de filtración como de la resistencia a la erosión de los materiales. El flujo de filtración generalmente se mide por el gradiente hidráulico en el análisis del inicio de la erosión interna. Las propiedades del material y las condiciones mecánicas de los materiales controlan la resistencia a la erosión del muro (Zhang et al., 2016).

#### **2.4.5 Capacidad de soporte**

Según Das (2013) sobrecargar el suelo de fundación puede resultar en asentamientos excesivos o en una falla por corte, por lo tanto, durante la etapa de diseño se debe verificar que ambas condiciones sean adecuadas.

Generalmente, este modo de falla se produce debido a la falta de información o la mala interpretación de los datos obtenidos durante la campaña geotécnica. La capacidad de soporte es mayor a medida que la densidad y las propiedades resistentes del suelo sean mejores. Según Clarkson (2021) las características que contribuyen a una falla por capacidad por soporte son las siguientes:

- Estructuras geológicas
- Superficies de deslizamiento
- Fisuras en el suelo/roca
- Presencias de suelos arcillosos, sin cohesión, dispersivos o blandos
- Presencia de capas débiles y erosionadas en las fundaciones
- Actividad sísmica e inundaciones previas
- Inclinación/declinación en la superficie de fundación
- Características del material de fundación, incluido el corte, resistencia, compresibilidad y permeabilidad

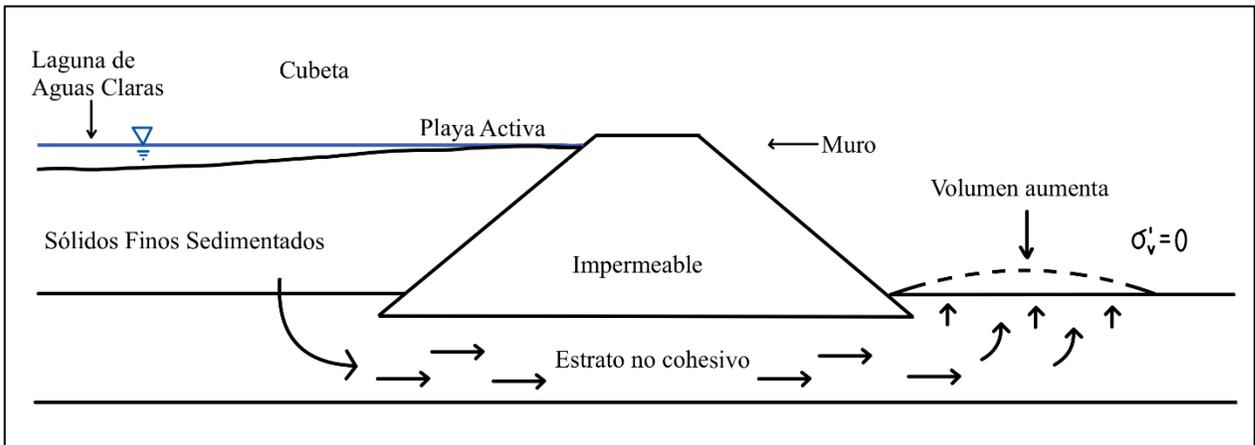
Según Clarkson (2021) el progreso de la falla por capacidad de soporte se puede revisar a través de la resistencia de corte, la permeabilidad y los asentamientos.

**Resistencia al corte:** La falla por resistencia al corte puede ocurrir de acuerdo con la teoría Mohr-Coulomb, cuando el esfuerzo cortante inducido es mayor que la resistencia de corte.

**Permeabilidad:** Los estratos impermeables o con baja permeabilidad pueden experimentar excesos de presiones de poros debido a la carga superficial y las operaciones en el depósito sin que

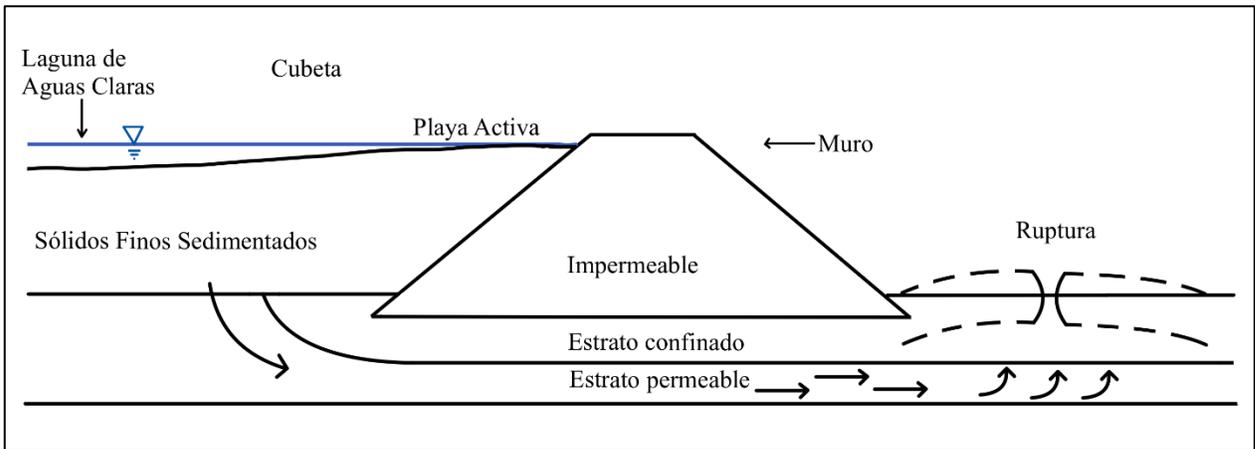
aumente la resistencia de corte, pudiéndose inducir una falla por capacidad de soporte. Por otra parte, materiales altamente permeables en el suelo de fundación pueden transmitir un flujo significativo, siendo capaz de erosionar el material en la base del muro comprometiendo su estabilidad.

En suelos de fundación que constan de estratos no cohesivos existen condiciones “rápidas” cuando se logra el gradiente hidráulico vertical crítico; la presión de poros es igual al peso unitario sumergido del suelo y por tanto la tensión efectiva es nula. Físicamente el material se levanta como se aprecia en la Figura 8.



**Figura 10: Esquema ilustrativo de falla por capacidad de soporte (Modificado de Clarkson, 2021)**

En el caso en que un estrato confinado de baja permeabilidad (como la arcilla) recubre un estrato permeable (como la arena), existe la posibilidad de falla cuando las presiones de filtración a través de la capa permeable exceden las presiones de sobrecarga en el pie de aguas abajo. Esto puede causar el levantamiento o explosión del estrato confinado, como se ilustra en la Figura 11.

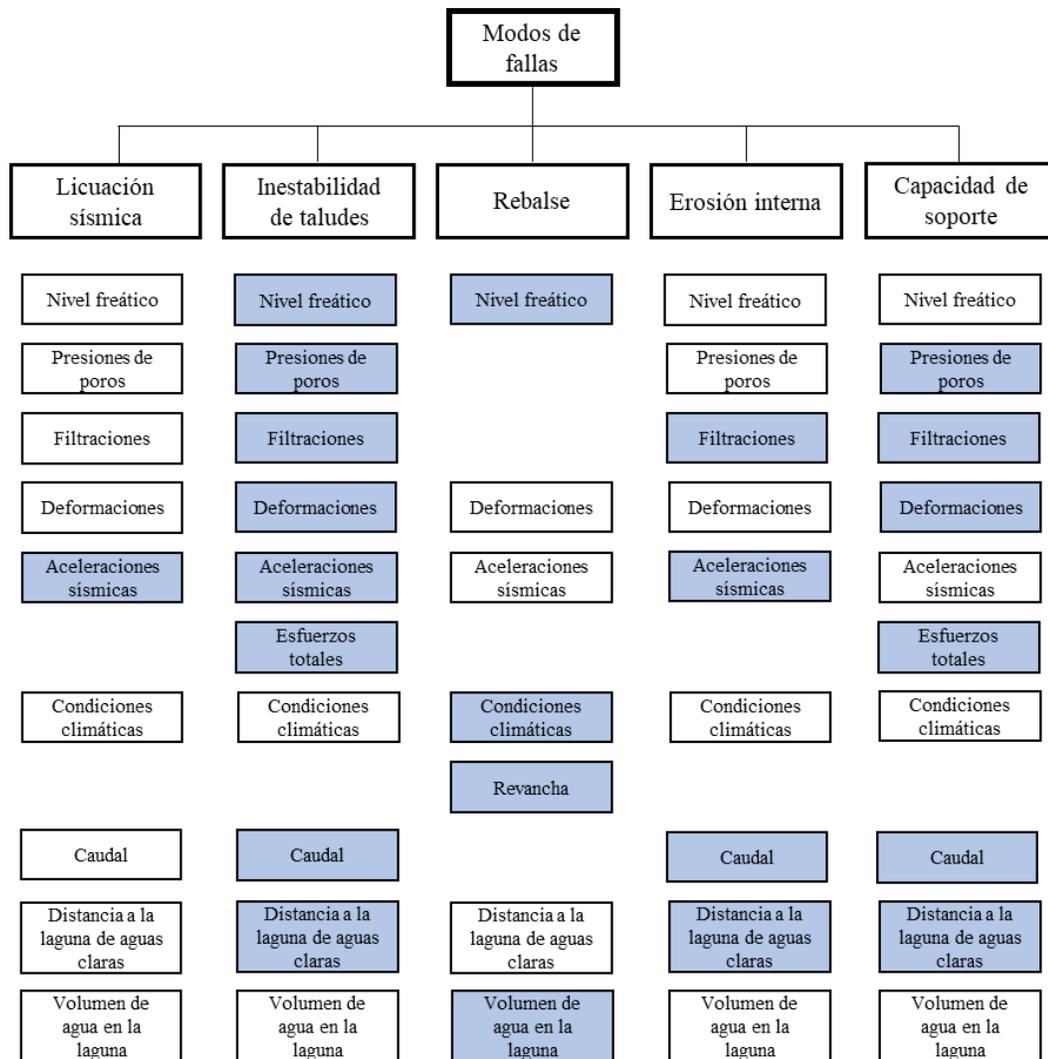


**Figura 11: Esquema ilustrativo de falla por capacidad de soporte (Modificado de Clarkson, 2021)**

**Asentamientos:** Hay tres principales formas de asentamiento: compactación, consolidación y erosión del suelo de fundación, las cuales dependen de las características y propiedades de los estratos.

## 2.5 Variables geotécnicas

Cada uno de los modos de fallas revisados, dependen de diversas variables geotécnicas. Según el Decreto Supremo n°248, para monitorear el comportamiento estructural e hidráulico del depósito, las variables a considerar son las presiones de poros, el nivel freático, los desplazamientos, los asentamientos, las filtraciones, las aceleraciones sísmicas y otras recomendadas por el profesional a cargo del proyecto. En la Figura 12 se presenta un diagrama con la utilidad del monitoreo de distintas variables para la identificación de los diversos modos de falla de acuerdo con Clarkson (2021) agregando variables que se consideran importantes. Estas variables son la revancha, el caudal, la distancia a la laguna de aguas claras y el volumen de agua en la laguna. En azul se destacan las variables cuyo monitoreo se puede utilizar directamente para identificar el desarrollo de un tipo de falla según Clarkson (2021), mientras que en blanco se incluyen las variables cuyo monitoreo considera que se puede utilizar solo de apoyo. Las primeras, Clarkson (2021) las denomina *indicadores directos*, mientras que las segundas las define como *indicadores de apoyo*.



**Figura 12: Esquema de variables a monitorear según los distintos modos de falla. Elaboración propia.**

Cabe mencionar que la Figura 12 incluye las variables presentadas en la sección 2.5 y 2.6.

A modo de ejemplificación, para el modo de falla por licuación sísmica, se consideran las aceleraciones sísmicas como un indicador directo de monitoreo ya que estas son el único indicador que permite identificar la ocurrencia del evento sísmico. Por otra parte, el nivel freático pese a tener una gran relevancia en la licuación (esta no puede ocurrir si no hay presencia de agua) no permite identificar por sí solo la posible ocurrencia del modo de falla, por lo que se considera como indicador de apoyo.

A continuación, se realiza una revisión de las variables a monitorear en los depósitos.

### **2.5.1 Nivel freático**

Es el nivel superior del agua, donde la presión de poros es igual a la presión atmosférica. El nivel freático dentro del muro juega un papel crítico en la estabilidad estática y sísmica del depósito. En la estabilidad estática aumenta el peso del muro y disminuye su resistencia, mientras que, en la estabilidad sísmica, la saturación de dichos materiales presenta un riesgo significativo a la licuación e inestabilidad mecánica. Para monitorear las aguas subterráneas se debe establecer la posición de laguna de aguas claras dentro de la cubeta, junto a la ubicación del nivel freático y la confirmación que los drenes funcionan de manera satisfactoria. (Villavicencio et al, 2013).

### **2.5.2 Presiones de poros**

La presión de poros es la presión que ejerce el agua sobre el suelo. La presión hidrostática aumenta linealmente con la profundidad por debajo de esta. Sin embargo, la succión del suelo en suelos de grano fino puede causar un aumento capilar y presiones de poros negativas por encima del nivel freático. Un cambio en la presión puede producir un desequilibrio en las fuerzas impulsoras y de soporte de la estructura, lo que puede resultar en la desestabilización de la estructura (Clarkson, 2021). Mediante las presiones de poros ( $u$ ) es posible obtener los esfuerzos efectivos ( $\sigma'$ ) a los que está sometido el suelo a través de la siguiente relación, donde  $\sigma$  son los esfuerzos totales (Dunnicliff,1993):

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1)$$

### **2.5.3 Filtraciones**

Las filtraciones se generan cuando el agua pasa a través del suelo. En los depósitos de relaves, pueden existir filtraciones a través del muro y por el suelo de fundación, lo que produce un aumento del grado de saturación. Esto no solo puede producir serios problemas de estabilidad, si no que puede generar filtraciones no controladas. Para prevenir filtraciones se dispone de sistemas de impermeabilización. Para recuperar y canalizar adecuadamente las filtraciones, se utilizan sistemas de drenajes.

### **2.5.4 Deformaciones**

Las deformaciones se pueden subdividir en deformaciones horizontales, deformaciones verticales (asentamientos) y finalmente las deformaciones producto de eventos sísmicos. A continuación, se presentan las principales características.

#### **2.5.4.1 Deformaciones horizontales**

Son movimientos horizontales que se esperan principalmente en el muro. Los relaves depositados en la cubeta y el peso propio del muro pueden generar esfuerzos suficientemente altos para producir deformaciones horizontales. Se controlan con el fin de evitar fallas asociadas a la estabilidad del talud.

#### **2.5.4.2 Asentamientos**

Son deformaciones verticales que se generan en suelos producto de cargas externas que comprimen los estratos. Esta compresión se debe a la deformación de partículas del suelo, la reorientación de las partículas y la expulsión de aire o agua de los espacios vacíos (Das, 2013). Se deben monitorear los asentamientos tanto del suelo de fundación, como del muro, para el último, se deben controlar, antes, durante y posterior a la construcción.

#### **2.5.4.3 Deformaciones sísmicas**

Las deformaciones causadas por eventos sísmicos pueden causar fisuras, que pueden reducir significativamente la seguridad del muro y comprometer la capacidad del depósito de relaves. En el caso de excesos de presiones de poros producidos por la acción de cargas sísmicas (carga cíclica), si el muro contiene material dilatante se puede generar el fenómeno de movilidad cíclica. (Villavicencio et al, 2013).

#### **2.5.5 Aceleraciones sísmicas**

Son mediciones de la aceleración a la que está sometido tanto el suelo de fundación como el muro debido a un evento sísmico. Se mide con el objetivo de conocer la amplificación que presentará la aceleración a través del muro.

Los terremotos, representan el 82% de todas las fallas de los depósitos de relaves en Chile (Clarkson, 2021) Por lo que considerar las aceleraciones sísmicas durante el diseño y su posterior monitoreo, es fundamental.

#### **2.5.6 Esfuerzos totales**

Los esfuerzos totales se miden con el objetivo de corroborar los valores utilizados para el análisis de estabilidad del muro. Si las tensiones son diferentes a las previstas, puede existir una anomalía en la estructura, que puede no haberse tenido en cuenta en el diseño, y por tanto en la evaluación y gestión de cualquier riesgo asociado (Clarkson, 2021)

#### **2.5.7 Revancha**

La revancha hidráulica es la diferencia de cota entre el nivel freático y el coronamiento del muro, mientras que la revancha física es la diferencia de cota entre los relaves y el coronamiento del muro. El objetivo de medir estas variables es prevenir una falla por rebalse. Según el Decreto Supremo N°248 la revancha en los depósitos de relaves deber ser, como mínimo, de 1 metro. Sin perjuicio de considerar los fenómenos climáticos que exigieren una mayor revancha.

### **2.5.8 Caudal**

El caudal es la cantidad de fluido que circula a través de una sección por unidad de tiempo. Se mide con el objetivo de evaluar la eficiencia del sistema de drenaje y correlacionar estos valores con incrementos del volumen de la laguna y los registros piezométricos.

### **2.5.9 Distancia a la laguna de aguas claras**

Es la mínima distancia entre la laguna de aguas claras y el muro resistente. Según el Decreto Supremo N°248, la laguna de aguas claras debe mantenerse lo más alejada posible del muro de contención con el fin de evitar su saturación y el consecuente aumento de la presión de poros y el eventual colapso.

### **2.5.10 Volumen de agua en la laguna**

Como su nombre lo dice, es el volumen de agua en la laguna de aguas claras. Mientras mayor sea el volumen de agua en la laguna, es más posible que el muro o el suelo de fundación se sature, pudiendo desencadenar (junto con otras condiciones) cualquiera de los modos de fallas nombrados anteriormente.

Para monitorear el volumen se requiere conocer la topografía del fondo cubierto por agua y la altura de agua. Para conocer la topografía del fondo se realiza un levantamiento batimétrico, el cual consiste en medir la profundidad mediante la emisión de ondas que rebotan con el fondo.

## **2.6 Otras variables**

En esta sección se incluye aquellas variables que no son geotécnicas pero que si permiten monitorear el desarrollo de modos de fallas.

### **2.6.1 Condiciones climáticas**

Las variaciones en las condiciones climáticas pueden influir en el comportamiento del depósito, principalmente en lo que respecta al nivel freático, puesto que esta variable tiene relevancia en los diversos modos de falla. Monitorear las condiciones climáticas permite identificar cuando otras variables como las filtraciones, la revancha, el caudal o el volumen de agua en la laguna pueden aumentar más allá de lo esperado.

## **2.7 Métodos y técnicas utilizadas para el monitoreo de variables geotécnicas.**

La instrumentación y monitoreo geotécnico de depósitos de relaves son necesarios para diversos aspectos, tales como: evaluar el rendimiento comparado con el diseño realizado previamente,

proporcionar conocimiento del comportamiento de la estructura, poder realizar estudios de evaluación de impacto ambiental y proporcionar una alerta temprana que resguarde la integridad de la obra y de las comunidades aledañas (AMTC, 2018).

Existen diversos instrumentos utilizados para monitorear las variables geotécnicas en depósitos de relaves. A continuación, se definen cada uno de estos clasificándolos según métodos invasivos, semi invasivos y no invasivos.

### **2.7.1 Métodos invasivos**

Los métodos invasivos son en su mayoría los instrumentos tradicionales utilizados para el monitoreo de depósitos de relaves. Estos instrumentos requieren ser instalados in situ para lograr las mediciones requeridas y dependen en gran medida de la manipulación realizada por el operario, donde una mala instalación o mantención del instrumento puede generar que el instrumento entregue datos erróneos o simplemente no entregarlos, perdiéndose información valiosa del estado del depósito.

En la Tabla 1 se presentan los instrumentos utilizados para medir las distintas variables de control asociados a los diversos mecanismos de falla. En azul se destacan las variables que son un indicador directo del desarrollo de una falla, mientras que en blanco se incluyen las variables que sirven como indicador de apoyo siguiendo el enfoque de Clarkson (2021).

**Tabla 1: Instrumentos invasivos a utilizar para medir las variables de control según los distintos mecanismos de falla. Elaboración propia.**

	Licuaación sísmica	Inestabilidad de taludes	Rebalse	Erosión interna	Capacidad de soporte
Nivel freático	• Piezómetro	• Piezómetro	• Piezómetro	• Piezómetro	• Piezómetros
Presiones de poros	• Piezómetro	• Piezómetro		• Piezómetro	• Piezómetro
Filtraciones	• Piezómetro • Aforador de caudal	• Piezómetro • Aforador de caudal		• Piezómetro • Aforador de caudal	• Piezómetro • Aforador de caudal
Deformaciones	• Inclínometro • Extensómetro • Clinoextensómetro • Inst. de medición topográfica • GPS/GNSS	• Inclínometro • Extensómetro • Clinoextensómetro • Inst. de medición topográfica	• Inst. de medición topográfica • GPS/GNSS	• Inclínometro • Extensómetro • Clinoextensómetro • Inst. de medición topográfica • GPS/GNSS	• Celdas de asentamientos • Inst. de medición topográfica • GPS/GNSS
Aceleraciones sísmicas	• Acelerómetro	• Acelerómetro	• Acelerómetro	• Acelerómetro	• Acelerómetro
Esfuerzos totales		• Celda de presión			• Celda de presión
Revancha			• Limnómetro		
Caudal	• Aforador de caudal	• Aforador de caudal		• Aforador de caudal	• Aforador de caudal

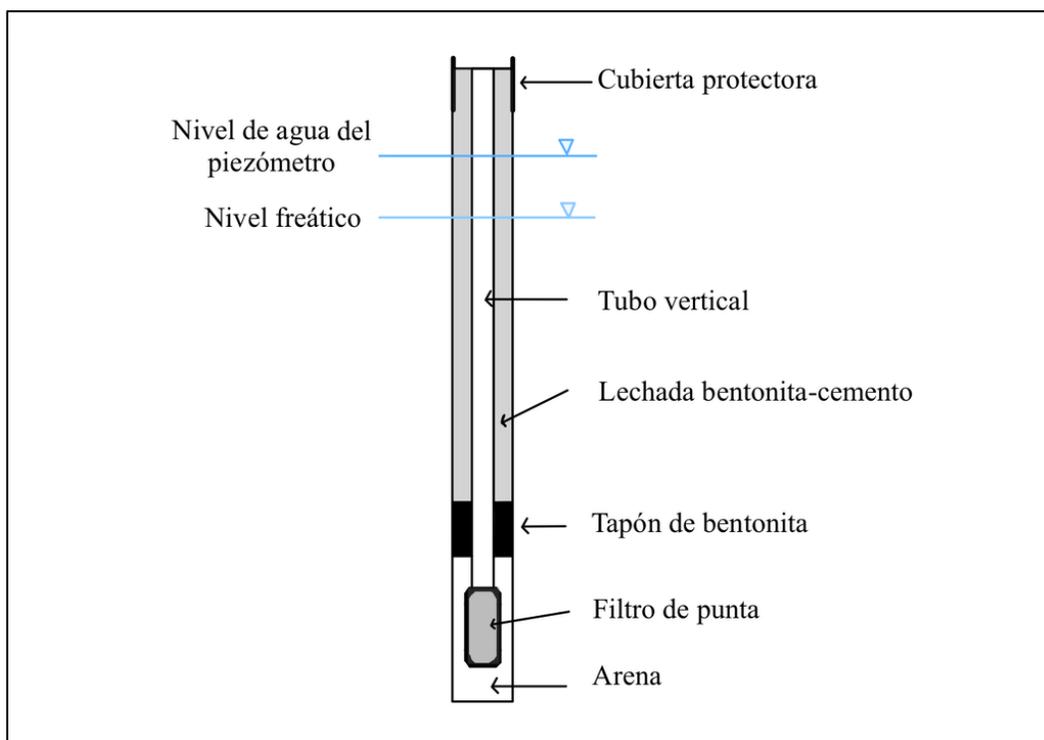
A continuación, se presentan principales características de los diversos instrumentos mencionados.

### 2.7.1.1 Piezómetro

Existen diversos tipos de piezómetros utilizados en depósitos de relaves para monitorear las presiones de poros y el nivel freático, a continuación, se presentan los más utilizados.

#### Piezómetro de Casagrande

El piezómetro de Casagrande es utilizado para monitorear el nivel freático. Consiste en un tubo de acero o PVC inserto en una perforación o sondaje unido a una boquilla de filtro que se coloca en arena. Un sello de bentonita se coloca por encima de la arena para aislar la presión de agua intersticial en la punta del filtro. El espacio anular entre el tubo ascendente y el pozo se rellena con lechada de bentonita-cemento para evitar la migración vertical del agua (Das, 2013). El agua fluye hacia el tubo vertical hasta que alcanza el equilibrio de presión. El nivel de agua en la tubería representa la presión de poros en el suelo alrededor de la zona de entrada (Clarkson, 2021)

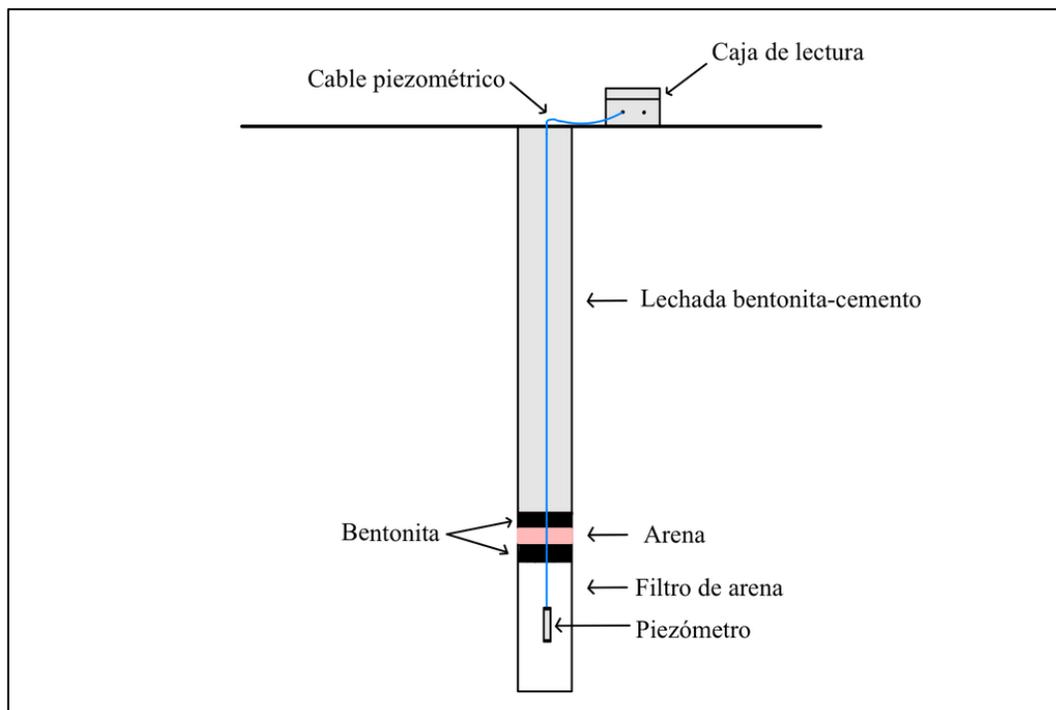


**Figura 13: Esquema de piezómetro Casagrande (Modificado de Das, 2013)**

### **Piezómetro de cuerda vibrante (PCV)**

El piezómetro de cuerda vibrante es un instrumento utilizado ampliamente en depósitos de relaves para monitorear el nivel freático registrando los cambios de las presiones de poros en el tiempo mediante lecturas automatizadas. Se instalan en sondeos ubicados en fundaciones o en el muro (puesto que otro tipo de instrumentos puede ser dañado durante la construcción).

El instrumento convierte la presión del agua en una señal de frecuencia a través de un diafragma, un cable de acero tensado y una bobina electromagnética. El cambio de presión en el diafragma provoca un cambio en la tensión del cable conectado. La vibración provocada en el cable en la proximidad de la bobina genera una señal de frecuencia que, con factores de calibración aplicados, proporciona una lectura de presión del agua. (Clarkson, 2021). Se puede instalar de diversas formas, en la Figura 14 se presenta una de ellas.



**Figura 14: Esquema de piezómetro de cuerda vibrante (Modificado de Geokon, 2022)**

### 2.7.1.2 Inclinómetro

Es un instrumento utilizado para monitorear el cambio de inclinación (rotación) de puntos en el suelo o estructuras (Dunncliff, 1993). Se ubican en el muro de contención del depósito de relaves. Existen inclinómetros deslizantes y fijos. A continuación, se describe cada uno.

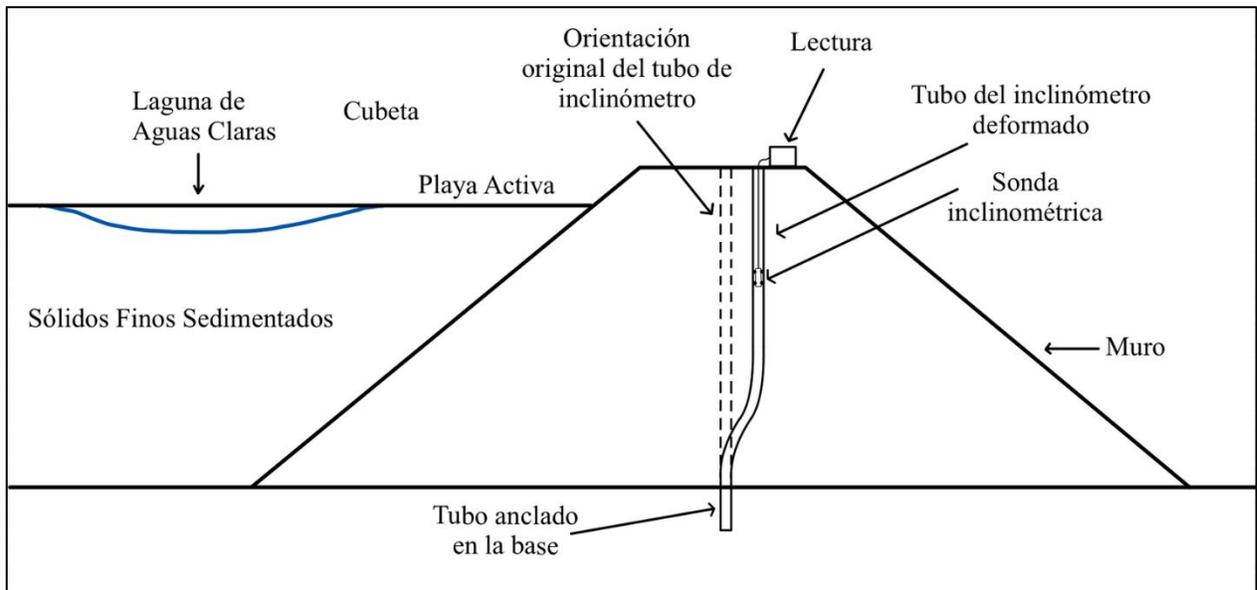
#### Inclinómetro deslizante

El sistema de inclinómetro está compuesto por cuatro componentes principales: (Suárez, 2009)

- Un tubo guía de plástico, acero o aluminio, instalado dentro de una perforación.
- 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.
- Un equipo de lectura en la superficie (que sirve de proveedor de energía) recibe las señales eléctricas, presenta las lecturas y en ocasiones, puede guardar y procesar datos.

Para la instalación del inclinómetro, primeramente, es necesario hacer una perforación. Posteriormente se coloca el tubo dentro de la perforación. Luego, se coloca lechada de cemento por la parte exterior del tubo para asegurarse que el inclinómetro se encuentre soportado en su totalidad. Finalmente, se introduce el sensor portátil, el cual está unido al cable de control que lo conecta con el equipo de lectura en la superficie. La perforación debe ser suficientemente profunda

tal que alcance una zona estable, de preferencia en roca (Suárez, 2009). En la Figura 15, se presenta un esquema de un sistema de inclinómetro deslizante.



**Figura 15: Esquema ilustrativo de un sistema de inclinómetro deslizante (Modificado de Suárez, 2009)**

### **Inclinómetro fijo, shape accel arrays (SAA)**

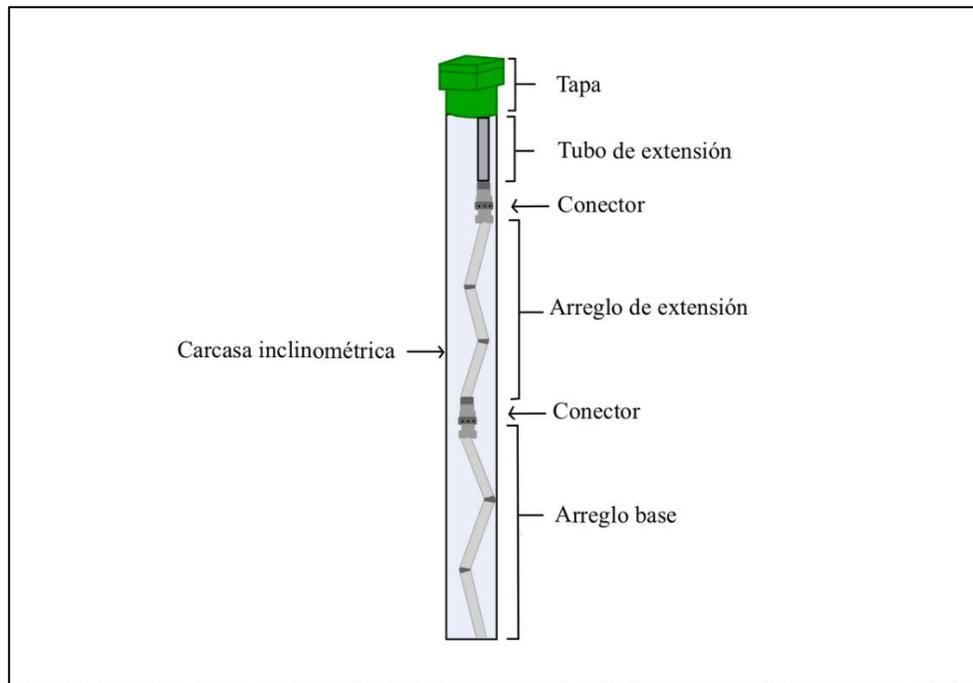
El ShapeArray es una herramienta de medición integrada que mide la deformación en el suelo y las estructuras en tiempo real. Este instrumento se puede utilizar en forma vertical, horizontal o inclinada dependiendo en qué dirección se desea medir las deformaciones.

Este inclinómetro, está formado por un arreglo de segmentos rígidos separados por juntas que se mueven en cualquier dirección, pero no giran. Cada arreglo de ShapeArray contiene tres sensores de inclinación MEMS, un microprocesador y un sensor de temperatura digital. Los sensores de gravedad MEMS miden la inclinación en dos direcciones, las cuales son transformadas por los procesadores obteniendo la ubicación en X, Y y Z de cada junta para producir forma y cambio de forma. Cada ShapeArray (SAA) viene en un contenedor y se instala dentro de un tubo de acceso (carcasa inclinométrica) que se inserta en un pozo.

Los desplazamientos se pueden almacenar en registradores de datos o leer directamente en computadoras y teléfonos móviles. Los SAA vienen en longitudes de hasta 150 m. (Geo-observations, 2022).

En la Figura 16 se presenta un esquema del Shape Accel Arrays (SAA). El tubo de extensión se utiliza cuando no se requiere realizar mediciones en zonas superficiales, mientras que el arreglo de

extensión permite aumentar o disminuir el tamaño del instrumento para así adecuarse a los requisitos de cada proyecto.



**Figura 16: Esquema ilustrativo de un sistema de inclinómetro fijo (Modificado de Geo-observations, 2022)**

### 2.7.1.3 Extensómetro de varilla

Los extensómetros de varilla se instalan en una perforación para controlar los desplazamientos a distintas profundidades utilizando barras de distinto material y longitud. A continuación, se presentan los pasos para la instalación del instrumento (Sisgeo, 2021c)

- Una longitud preestablecida de varilla se inserta en un tubo de nylon para evitar la fricción del terreno y su punta se fija a un ancla de acero cementable.
- Las varillas premontadas se enrollan y se envían listas para su instalación.
- El conjunto completo se inserta en el pozo de sondeo y luego se inyecta la lechada.
- Se fijan los anclajes a la roca o el terreno, permitiendo el libre movimiento de cada varilla dentro de la manga.

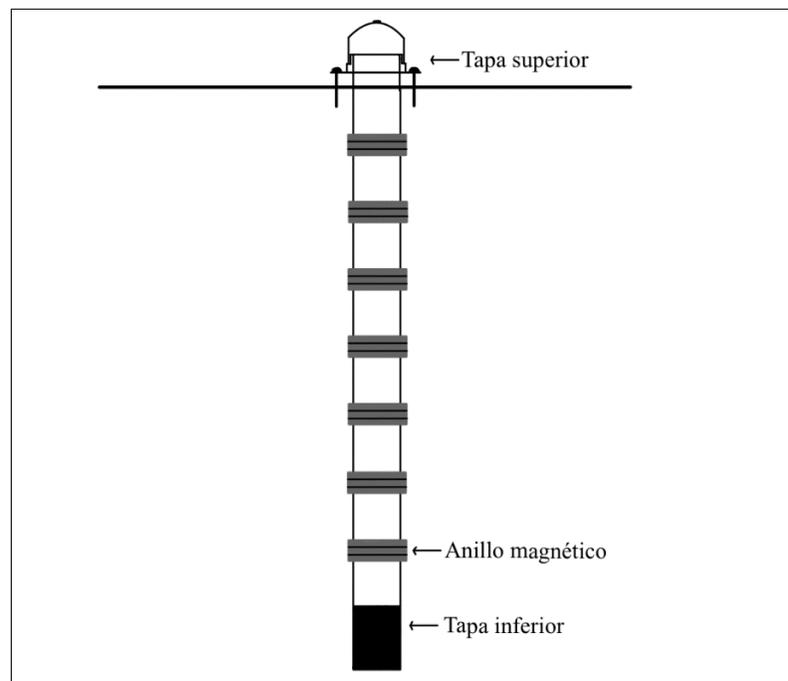
Los movimientos relativos entre los anclajes y la cabeza de referencia se miden manualmente con transductores a pinza o lineales montados en la cabeza de referencia para el monitoreo remoto.



**Figura 17: Extensómetro (Sisgeo, 2021b)**

#### **2.7.1.4 Clinoextensómetro**

Este instrumento es una sonda 3D con una combinación exclusiva de dos sensores, un inclinómetro MEMS biaxial de alta precisión para leer los desplazamientos en el eje horizontal y un sensor magnético sin contacto para monitorear los desplazamientos verticales. Una cadena de sondas instaladas en un pozo permite la ventana única de devolver un perfil 3D tanto del revestimiento como del terreno circundante donde se instala la cadena (Sisgeo, 2022)



**Figura 18: Esquema ilustrativo del clinoextensómetro (Modificado de Sisgeo, 2022)**

#### **2.7.1.5 Limnómetro**

Es un instrumento utilizado para medir la revancha física del muro. Consiste en una placa de metal graduada en centímetros ubicada verticalmente aguas arriba del muro, desde la cual es posible leer la posición del nivel de relaves. Una vez medido el nivel, conociendo la ubicación del instrumento,

se calcula la revancha como la diferencia entre la cota del coronamiento del muro y la cota de los relaves.



**Figura 19: Limnómetro (Directindustry, 2021)**

#### **2.7.1.6 Celdas de asentamientos de cuerda vibrante**

Son instrumentos utilizados para llevar un control de los asentamientos producidos en el suelo de fundación durante y posterior a la construcción del muro. La celda consiste en un transductor de presión de cuerda vibrante conectado a través de un par de tubos de nylon llenos de agua a un reservorio hidráulico de referencia ubicado en un terreno estable. (Geosensor, 2021).



**Figura 20: Celda de asentamiento (Geosensor, 2021).**

### 2.7.1.7 Celda de presión

Las celdas de presión son instrumentos utilizados para medir los esfuerzos totales. Constan de dos placas de acero inoxidable soldadas entre sí en torno a su periferia. El espacio anular entre las placas se llena al vacío por aceite desairado (Sisgeo, 2021a). Se suelen ubicar en el contacto del suelo de fundación con el muro, bajo el coronamiento, pues en este punto se esperan tener mayores esfuerzos totales en el muro.

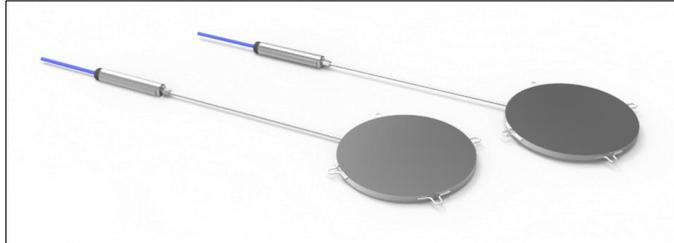


Figura 21: Celdas de presión con cuerda vibrante (Sisgeo, 2021a).

### 2.7.1.8 Aforador de caudal

Son instrumentos utilizados para medir el caudal. Se ubican en el dren central del sistema de drenaje de tal manera de medir el caudal total recolectado por el sistema. Se utiliza para monitorear las filtraciones a través del muro. Los aforadores de caudal comunes son los caudalímetros de tubería y los vertederos de aforo. Dependiendo del sistema de drenaje se ocupa uno o el otro.



Figura 22: Caudalímetro de tubería (Onicon, 2021)

### 2.7.1.9 Acelerómetro

Este instrumento se utiliza para registrar y cuantificar las aceleraciones experimentadas producto de eventos sísmicos. Usualmente se instalan 3 acelerómetros, uno en el coronamiento del muro, con el fin de analizar la respuesta sísmica del muro, otro en aguas abajo del muro, con el objetivo

de estudiar la respuesta del suelo y finalmente otro en roca. Con estas tres mediciones se espera conocer en detalle la amplificación que presentará la aceleración a través del muro. Permite medir las aceleraciones en eventos sísmicos con magnitudes moderadas y altas ( $MI > 3$ ) (AMTC, 2018).



**Figura 23: Acelerógrafo (Geoteknik, 2021).**

#### **2.7.1.10 GPS/GNSS**

El GPS/GNSS es un sistema que determina la posición de un objeto. El funcionamiento se basa en un receptor (objeto) que recibe señales enviadas desde diferentes satélites, identificando su posición. El tiempo se utiliza para determinar la distancia desde el receptor a todos los satélites. Con la distancia es posible determinar la posición del receptor (AMTC, 2018)



**Figura 24: GPS (Mssdefence, 2022).**

### 2.7.1.11 Prisma de control topográfico

Son aparatos que se instalan para señalar puntos de referencias en terreno. Se utilizan para medir desplazamientos y/o asentamientos a través de instrumentos topográficos. En el caso de depósitos de relaves, se instalan en el coronamiento del muro para monitorear las deformaciones superficiales laterales (horizontales) y verticales (asentamientos) durante la construcción y la operación de este.

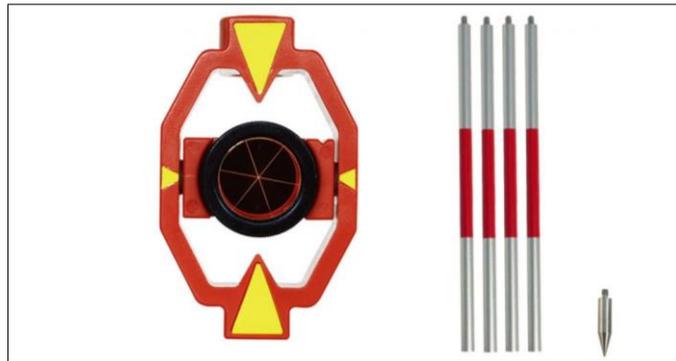


Figura 25: Prisma de control topográfico. (GrupoAcre, 2021).

### 2.7.2 Métodos semi invasivos

Los métodos semi invasivos son aquellos instrumentos que deben instalarse cerca o sobre el muro para realizar la medición, pero a diferencia de los métodos invasivos, no requieren perforaciones ni se ubican dentro del muro. En la Tabla 2 se presenta un resumen con los métodos a revisar.

Tabla 2: Métodos semi invasivos a utilizar para medir las variables de control según los distintos mecanismos de falla.

	Licucción sísmica	Inestabilidad de taludes	Rebalse	Erosión interna	Capacidad de soporte
Filtraciones	• Tomografía de resistencia eléctrica	• Tomografía de resistencia eléctrica		• Tomografía de resistencia eléctrica	• Tomografía de resistencia eléctrica
Deformaciones	• Escáner láser • Radar de estabilidad de taludes (SSR)	• Escáner láser • Radar de estabilidad de taludes (SSR)	• Estación total automática	• Estación total automática	• Estación total automática
Condiciones climáticas	• Estación meteorológica automática	• Estación meteorológica automática	• Estación meteorológica automática	• Estación meteorológica automática	• Estación meteorológica automática
Volumen de agua en la laguna	• Bote tripulado • Bote no tripulado	• Bote tripulado • Bote no tripulado	• Bote tripulado • Bote no tripulado	• Bote tripulado • Bote no tripulado	• Bote tripulado • Bote no tripulado

### 2.7.2.1 Levantamiento batimétrico

El levantamiento batimétrico es un método que permite conocer la topografía del fondo del agua. En depósitos de relaves se utiliza para obtener el volumen de la laguna de aguas claras. La batimetría puede realizarse mediante un bote (tripulado o no tripulado).



Figura 26: Bote no tripulado. (Geosensor, 2022).

Ayu et al (2018) realizaron un estudio sobre levantamiento batimétrico en áreas costeras usando imágenes satelitales. Los autores indican que es un método de bajo costo, con una amplia área de cobertura, sin embargo, mencionan que para obtener buenos resultados se debe contar con aguas claras pocas profundas (es capaz de detectar profundidades de hasta 30 metros en función de la capacidad de penetración de la luz)

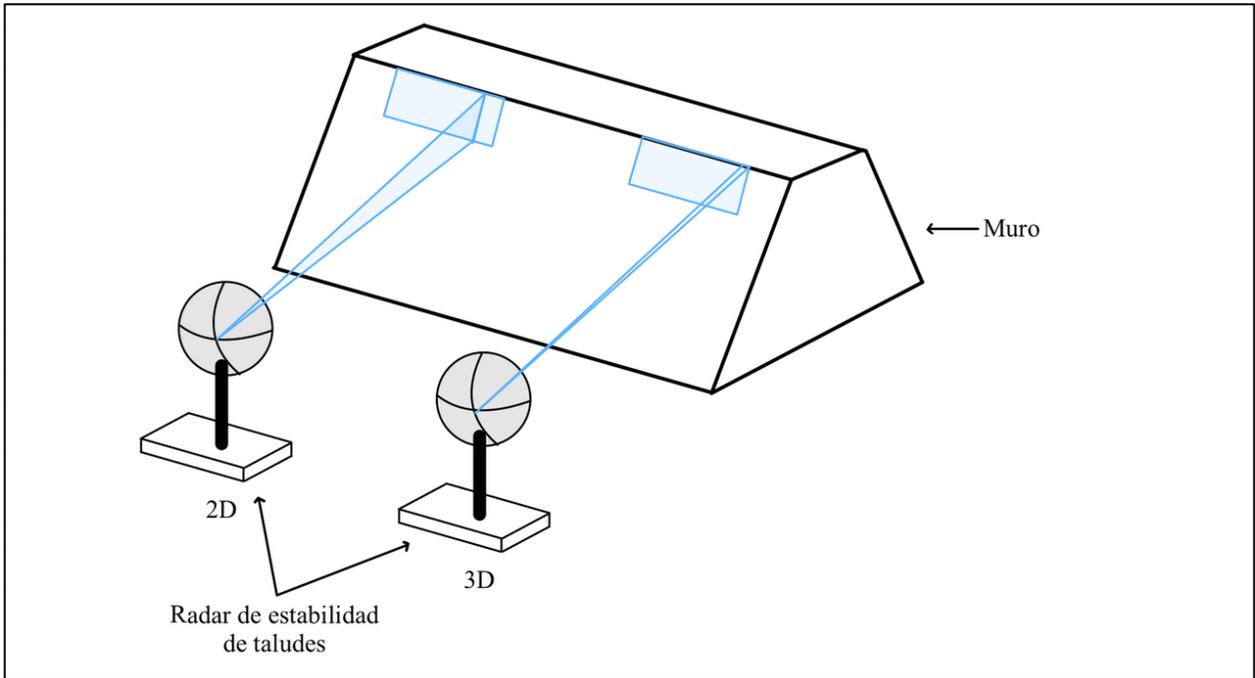
### 2.7.2.2 Radar de estabilidad de taludes (SSR)

El radar de estabilidad de taludes permite conocer las deformaciones ocurridas en el talud por medio de mediciones asociadas a áreas de control (no solo puntuales como los prismas de control topográfico). Utiliza tecnología de Radar de Apertura Sintética (SAR) o Radar de Apertura Real (RAR) permitiendo generar modelos 2D o 3D. A continuación, se presenta una leve descripción del funcionamiento de estos radares utilizando las diferentes tecnologías (Groundprobe, 2021).

**Radar de Apertura Real (RAR) 2D:** Monitorea áreas amplias a través de una franja vertical delgada que se desplaza rápidamente alrededor del muro de izquierda a derecha, detectando puntos críticos de movimientos.

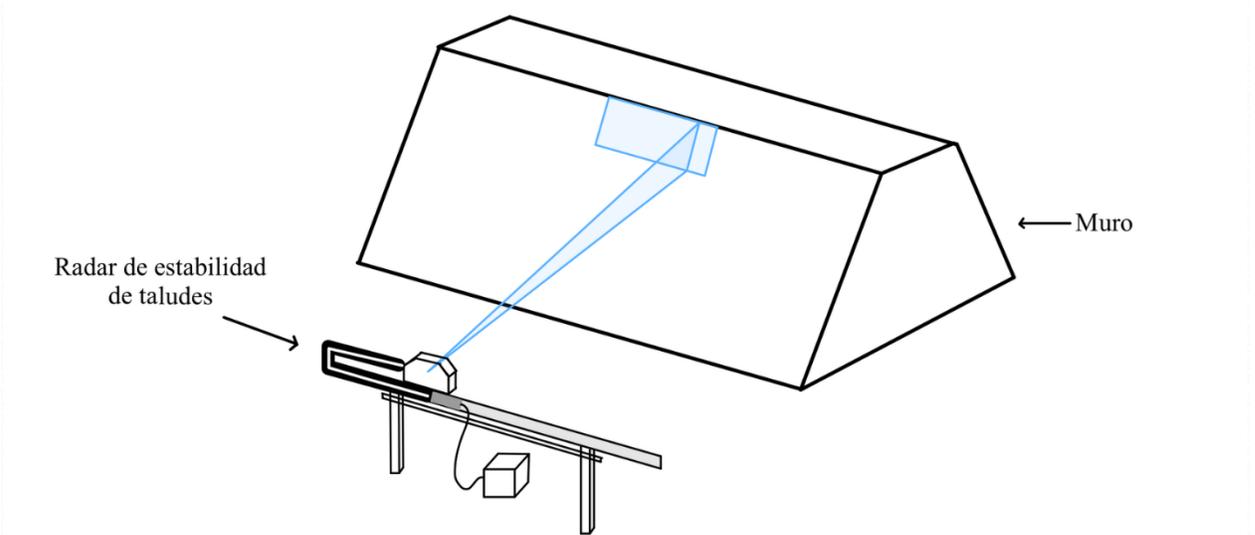
**Radar de Apertura Real (RAR) 3D:** Utiliza un haz fino en forma de lápiz para proporcionar imágenes completas en 3D

El radar de estabilidad de taludes con tecnología (RAR) tiene un alcance entre 30 a 2800 m, 3500 m o 5600 m según el modelo. (Clarkson, 2021)



**Figura 27: Radar de estabilidad de taludes con tecnología RAR (Modificado de Clarkson, 2021)**

**Radar de apertura sintética (SAR) 2D:** Produce una antena artificial muy larga usando un movimiento hacia adelante para llevar la antena real corta a posiciones consecutivas a lo largo de la línea de vuelo. Tiene un alcance entre 10 a 5000 m. (Clarkson, 2021)



**Figura 28: Radar de estabilidad de taludes con tecnología SAR (Modificado de Clarkson, 2021)**

La visualización de los movimientos en tiempo real permite un continuo manejo de los riesgos relacionados a la inestabilidad de taludes, por lo que se ha convertido en un instrumento ampliamente utilizado por grandes mineras a nivel mundial. Cabe mencionar que los radares no

necesariamente son fijos (las imágenes son referenciales) dado que en la actualidad los radares se pueden montar en vehículos para su traslado.

### 2.7.2.3 Escáner láser

El escáner láser es un dispositivo que permite crear una nube de puntos obteniendo una representación en tres dimensiones. Se basa en un rayo láser giratorio que es montado en una plataforma estable, como un trípode o un pilar, o en una plataforma móvil, como un automóvil o un dron. El escáner láser ocupa la tecnología LiDAR (revisado posteriormente). En depósitos de relaves se utiliza para monitorear la estabilidad del talud a través de las deformaciones. (Lienhart, 2017). Tiene un alcance de hasta 4000 m o 6000 m dependiendo el modelo.

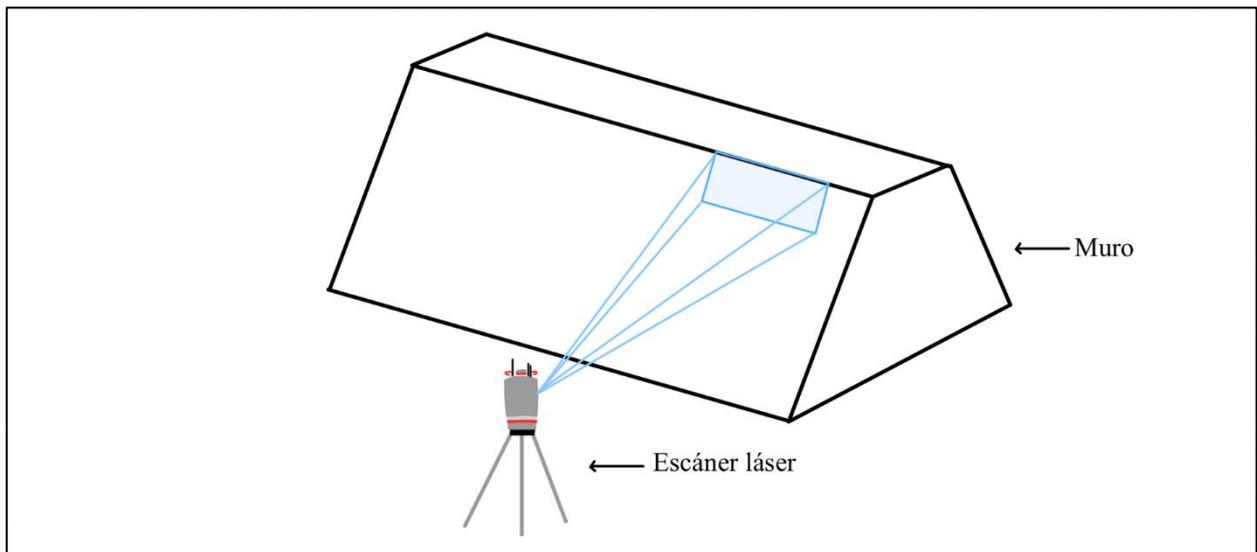
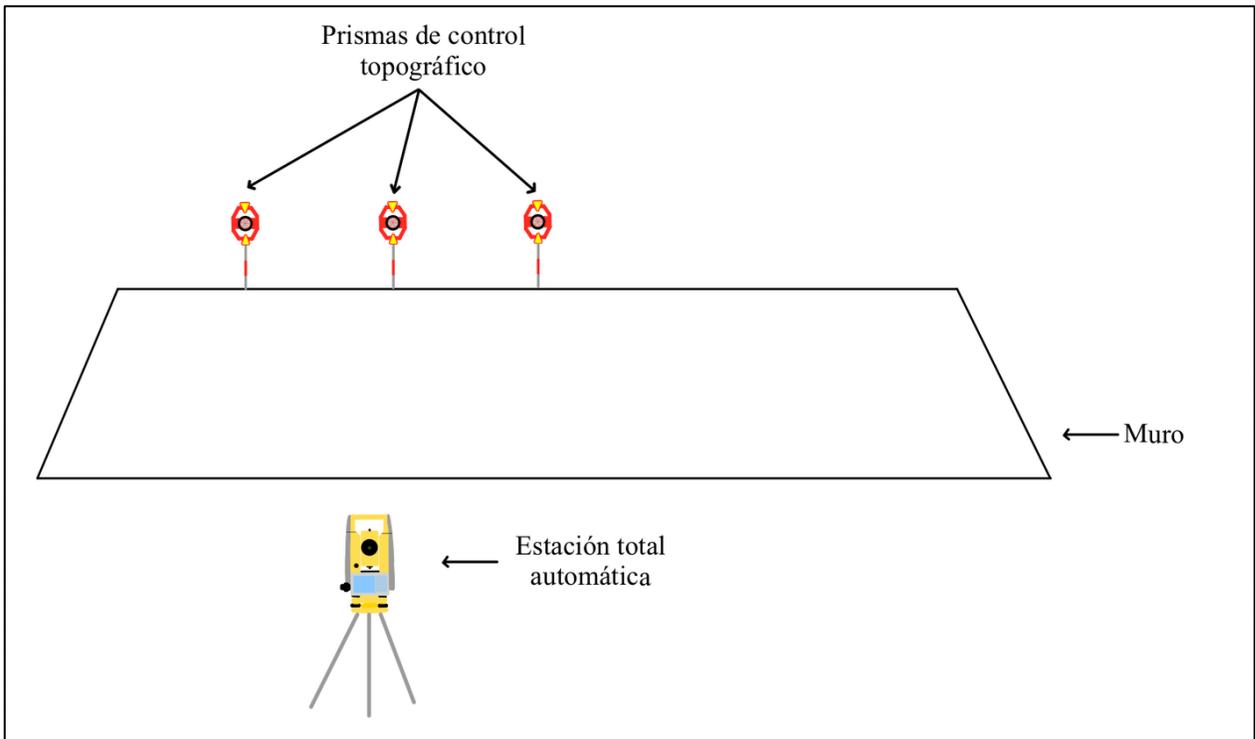


Figura 29: Esquema ilustrativo de Escáner láser. Elaboración propia.

### 2.7.2.4 Estación total automática

La estación total es un instrumento que permite medir ángulos verticales, horizontales y distancias con un alto nivel de precisión. Las mediciones de distancia se realizan a través de una onda electromagnética portadora con distintas frecuencias, que rebota en un prisma ubicado en el punto a medir y regresa. (Topoequipos, 2021). Una estación total automática es más precisa que una manual, y disminuye al mínimo la intervención humana. El alcance es de entre 1,5 m a 7000 m (Clarkson, 2021). Sus formas de utilizar son:

- Se realiza un monitoreo activo con un operador que mueva la ubicación de la estación y/o el prisma.
- Se puede mantener fija la ubicación de la estación total y de los prismas para un monitoreo remoto continuo. Esto permite la generación de alarmas en caso de gran variación en la ubicación de los prismas.



**Figura 30: Esquema de estación total automática en depósitos de relaves. Elaboración propia.**

### 2.7.2.5 Tomografía de resistividad eléctrica (ERT)

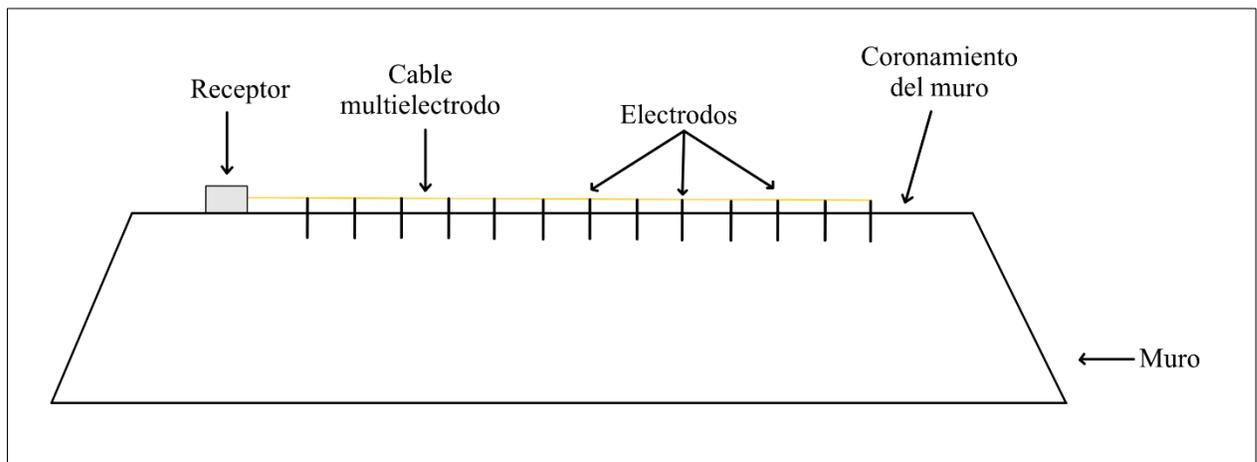
La tomografía eléctrica es un método de exploración geofísico utilizado para medir la resistividad eléctrica del subsuelo. Consiste en inyectar corriente eléctrica continua al terreno a través de unos electrodos ubicados a lo largo un perfil de forma equidistante. Con la intensidad de esta corriente y de la diferencia de potencial observada, se obtiene un valor de resistividad aparente. A partir de esos resultados, mediante un proceso de inversión es posible obtener el modelo de distribución de resistividad eléctrica real. Los resultados de resistividad eléctrica normalmente se utilizan para correlacionarlos con información geológica de la zona, como el nivel freático y la ubicación de la roca basal.

Según Córdova & Bari (2021) la tomografía de resistividad eléctrica en la industria minera se utiliza normalmente para el monitoreo de desechos mineros en presas de relaves, pilas de lixiviación y lugares similares que se caracterizan por el contraste del contenido de resistividad debido a fugas y filtraciones a través del suelo. Sin embargo, los autores proponen la utilización de tomografía de resistividad eléctrica para realizar un permanente monitoreo automatizado de filtraciones en depósitos de relaves permitiendo identificar posibles filtraciones, formaciones de fracturas o diferentes contenidos de agua. La instalación permanente de sensores in situ acompañado de la telemetría ha demostrado ser particularmente atractiva ya que permite manipular la adquisición de datos de forma remota.

Igor Bravo, CEO de Geosinergia, una de las empresas de instrumentación geotécnica más grande de Chile comenta que la instalación del sistema se realiza en una zanja en el eje longitudinal del

coronamiento del muro. Además, se pueden instalar electrodos en ejes transversales ubicados en el talud de aguas abajo del muro para monitorear en forma completa las filtraciones. Menciona además que según el largo del muro es posible realizar una o dos mediciones diarias, lo que permite monitorear el funcionamiento del sistema de drenes y observar la evolución de posibles mitigaciones.

Otra aplicación de ERT son la obtención de propiedades mecánicas del suelo a través de diversas correlaciones con la resistividad eléctrica. Algunos parámetros que pueden obtenerse son la resistencia al corte, contenido de humedad, índice de vacíos, la porosidad, el grado de saturación y límites de Atterberg. (Bery, 2016).



**Figura 31: Esquema del arreglo en la tomografía de resistividad eléctrica. Elaboración propia.**

#### **2.7.2.6 Estación meteorológica automática**

La estación meteorológica es un equipo que permite obtener y transmitir diferentes variables meteorológicas con el fin de conocer las condiciones climáticas de la zona. Incorpora diversos sistemas de medición, los cuales permiten conocer la velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad, punto de rocío, presión atmosférica, lluvia e intensidad de lluvia, radiación solar, evaporación, profundidad de nieve, entre otros.



Figura 32: Estación meteorológica. (Darrera, 2022)

### 2.7.3 Métodos no invasivos

Los métodos no invasivos son aquellos instrumentos que permiten realizar mediciones sin estar instalados en o cerca del depósito de relaves. Estos métodos pueden realizarse mediante diversos vehículos, como avión, helicópteros, dron (vehículo aéreo no tripulado controlado mediante control remoto o de forma autónoma siguiendo una misión preprogramada) o satélites. Aunque los más comunes son los drones o satélites debido a su bajo costo en comparación a los otros. En la Tabla 3 se presenta un resumen con los métodos a revisar.

Tabla 3: Métodos no invasivos a utilizar para medir las variables de control según los distintos mecanismos de falla.

	Licuación sísmica	Inestabilidad de taludes	Rebalse	Erosión interna	Capacidad de soporte
Deformaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LiDAR</li> <li>• InSAR</li> <li>• Fotogrametría</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LiDAR</li> <li>• InSAR</li> <li>• Fotogrametría</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LiDAR</li> <li>• InSAR</li> <li>• Fotogrametría</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LiDAR</li> <li>• InSAR</li> <li>• Fotogrametría</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LiDAR</li> <li>• InSAR</li> <li>• Fotogrametría</li> </ul>
Temperatura		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Imágenes térmicas</li> </ul>			

#### 2.7.3.1 Light detection and ranging (LiDAR)

Es una técnica de teledetección utilizado para medir distancia a través de un láser. Consiste disparar pulsos rápidos de luz láser a una superficie y medir el tiempo que tarda el pulso en rebotar hasta la fuente. La distancia entre la fuente y el objeto se puede medir con gran precisión (Clarkson, 2021).

Permite obtener una nube de puntos tridimensionales. La medición de los datos puede ser terrestre, aérea o satelital.

### 2.7.3.2 Sistema de radar de apertura sintética interferométrica (InSAR)

El radar de apertura sintética interferométrica (InSAR) es una técnica que utiliza múltiples adquisiciones de imágenes de radar en la misma área para medir cambios temporales en la distancia entre el satélite y el suelo. Dado que la posición del satélite se conoce en cada adquisición, este procedimiento es capaz de medir deformaciones del suelo (Oommen et al, 2019). En la actualidad, presentan tiempos de revisión de 16, 11, 8 e incluso 4 días (Colombo & Macdonald, 2015). El satélite InSAR puede utilizarse para apoyar la toma de decisiones y mejorar la capacidad de predicción de fallas de taludes (Carlà et a, 2019) en base a la evolución temporal y espacial de los desplazamientos. Cabe mencionar que en ocasiones se distingue D-InSAR (diferencial) como aquella técnica que utiliza dos imágenes, mientras que se considera como MT-InSAR (multi temporal) cuando se utiliza varias imágenes.

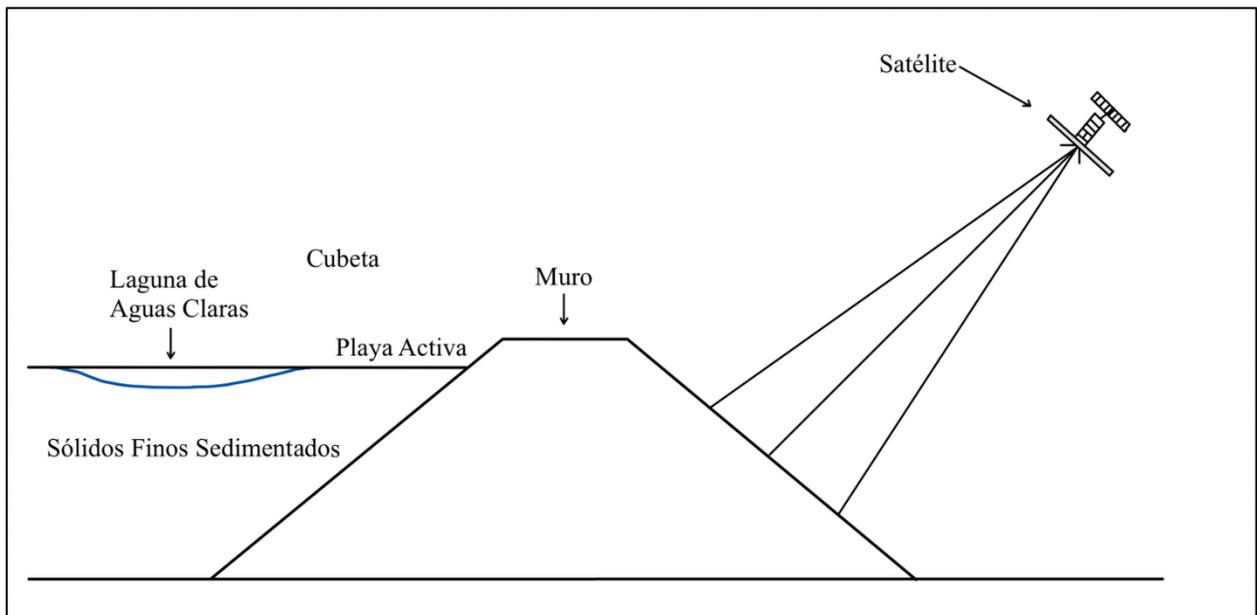


Figura 33: Esquema ilustrativo del satélite. Elaboración propia.

### 2.7.3.3 Fotogrametría

Según la RAE la fotogrametría es el procedimiento para obtener planos de grandes extensiones de terreno por medio de fotografías aéreas. Su principal objetivo es convertir los datos obtenidos de dos dimensiones en información tridimensional. Para esto, se capturan diversas imágenes de la zona a estudiar y posteriormente se realiza el procesamiento de las imágenes obteniendo un plano 2D o un modelo 3D.

### 2.7.3.4 Imágenes hiperespectrales (HSI)

Las características físicas y químicas de un material pueden ser analizadas mediante un análisis espectral con ondas electromagnéticas. El espectro de ondas electromagnéticas se divide en una serie de grupos, dentro de las que se destacan los rangos ultravioleta, visible, infrarrojo y microondas como se presenta en la Figura 34.

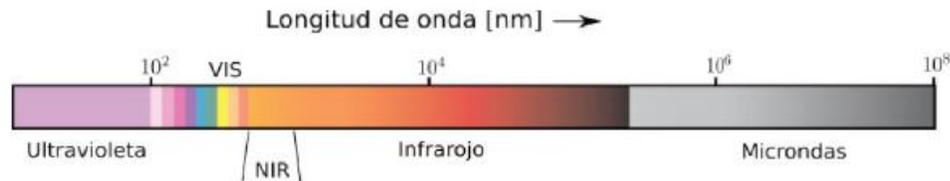


Figura 34: Espectro de ondas electromagnéticas (Araya et al, 2019)

Las imágenes hiperespectrales son imágenes que recopilan y procesan información a través de bandas espectrales contiguas y muy estrechas (Lillesand et al, 2015). Con estas imágenes es posible determinar diversas variables como densidad, temperatura, humedad, entre otras (Araya et al, 2019).

Las imágenes multiespectrales funcionan similar a las imágenes hiperespectrales, sin embargo, su diferencia radica en que las primeras constan de datos de imágenes adquiridas selectivamente en múltiples bandas anchas espectrales (Lillesand et al, 2015). Como las imágenes hiperespectrales utilizan una mayor cantidad de bandas y más estrechas, permiten obtener una mayor cantidad de información.

### 2.7.3.5 Imágenes térmicas

Las imágenes térmicas miden la energía radiante infrarroja térmica de los objetos. A partir de esta energía es posible conocer la temperatura de la superficie de un objeto sin necesidad de medirla in situ. Las imágenes térmicas no dependen de la radiación solar reflejada, lo que les permite funcionar en cualquier momento del día o de la noche (Lillesand et al, 2015).

Una de las aplicaciones de las imágenes térmicas es el monitoreo de taludes mediante la detección de cambios en la temperatura de radiación superficial. Estos cambios permiten ubicar áreas potencialmente inestables (Chen & Liu, 2017). Además, mediante imágenes térmicas es posible conocer el contenido de humedad superficial de los relaves. (Zwissler et al, 2017),

## 2.8 Sistemas de información

Para almacenar, procesar y visualizar la información obtenida de los diversos instrumentos cada vez son más utilizados los sistemas de información. Según Clarkson (2021) hay una serie de elementos que se pueden abordar para mejorar la calidad del sistema de información:

- Interfaz del usuario o lo que el usuario ve y con lo que interactúa, para la manipulación y difusión de datos.
- Criterios de alarma automatizados vinculados a un sistema de respuesta/alerta.
- Aplicaciones basadas en web para permitir el acceso a muchos usuarios al mismo tiempo.
- Base de datos empresarial para almacenar grandes volúmenes de datos capturados y facilitar el respaldo remoto.
- Controles de seguridad de información.

Con relación a la interfaz del usuario, Clarkson (2021) indica que es la herramienta principal en el sistema de información que el ingeniero geotécnico consultará para análisis, informes y comunicación, por lo que las mínimas funciones que una interfaz debe tener son:

- La capacidad de consultar tendencias de datos históricos y actuales de instrumentos individuales (y múltiples) instalados en la mina. Esto debería estar disponible a través de datos sin procesar y medios gráficos.
- Una vista frontal y central de donde y qué nivel de alarma se activa en el sitio.
- Funciones de informes personalizables, incluida la salud actual, las tendencias de lectura durante el periodo de tiempo designado y las tendencias de lectura desde la instalación.
- Pronóstico de tendencias basado en la regresión seleccionada por el usuario.

## **2.9 Estado de la práctica según la literatura de los sistemas de monitoreo geotécnico en depósitos de relaves**

En esta sección se revisa el estado de la práctica según la literatura, tanto internacional como chilena de los sistemas de instrumentación de monitoreo geotécnico en depósitos de relaves.

### **2.9.1 Literatura internacional**

En Clarkson (2021), a través de 25 practicantes de presas de relaves encuestados de diversas partes del mundo, se concluyó que dos tercios de los practicantes encuestados están de acuerdo en que la frecuencia de la lectura de instrumentación según lo dispuesto a través de leyes, reglamentos o pautas es insuficiente para capturar el inicio y la progresión de diferentes tipos de fallas. Además, se identificaron varias áreas de mejora en la gestión y regulación de las técnicas de monitoreo de presas de relaves:

- Los requisitos rígidos y prescriptivos impulsados por la regulación no tienen la flexibilidad para abordar adecuadamente las condiciones únicas de cada sitio.
- El monitoreo continuo y las actualizaciones/auditorías del operador debe llevarse a cabo para evitar la autocomplacencia.
- Es valioso establecer un plan de respuesta estructurado y sistemático para mitigar el error humano en situaciones estresantes.

- Se requiere una mayor especificación por parte de los reglamentos sobre la frecuencia de monitoreo.
- Se deben comunicar los estándares de monitoreo de referencia basados en aprendizajes globales: “No sabes lo que no sabes”.
- No es suficiente definir la frecuencia de las lecturas. Debe haber una comprensión de la respuesta de cada instrumento y la integración de ellos.
- Con un dispositivo de telemetría, podemos obtener una mejor comprensión del inicio y progresión de una falla potencial.

Con relación a la forma de correlacionar la información entre los diversos instrumentos de monitoreo, Clarkson (2021) indica que solo el 21% de los depósitos encuestados integra la información obtenida a través de plataforma tecnológica.

Hui, Charlebois & Sun (2017) revisaron el estado de la práctica a través de experiencia personal y la consulta con más de 40 entidades involucradas en la Industria y concluyeron que:

- “En primer lugar, la mayoría de los depósitos de relaves serán sometidos a una inspección visual superficial de rutina. La lectura de la instrumentación normalmente se realiza de forma manual y con poca frecuencia, limitada por las condiciones de acceso seguro, el clima y la disponibilidad de personal. El monitoreo a menudo lo realiza personal subalterno o poco calificado que puede carecer de experiencia y juicio necesarios para escalar las inquietudes identificadas durante una inspección. Esto es especialmente cierto en operaciones más pequeñas que pueden no emplear un equipo sustancial de monitoreo ambiental o estructural. Además, puede ser precario y peligroso para los trabajadores acceder a la instrumentación en el frente o cerca del estanque (agua retenida detrás de la presa), especialmente en condiciones climáticas adversas. Todas las actividades están sujetas a errores humanos y riesgos morales, incluidos informes inexactos, identificación errónea de instrumentación y omisión de instrumentación”.
- “En segundo lugar, las lecturas manuales y el procesamiento de datos pueden requerir una cantidad considerable de horas por persona, lo que puede provocar retrasos de hasta unos pocos días antes de que puedan identificar las tendencias de comportamiento (Newcomen, 2002). Durante y después de un evento extremo, como un terremoto o una lluvia torrencial, la recopilación y el procesamiento de las mediciones manuales pueden retrasar la evaluación de las condiciones de la presa de relaves y pueden exponer directamente a los trabajadores a un peligro potencial para la salud y seguridad”.
- “Tercero, algunas técnicas de monitoreo solo pueden proporcionar información durante un periodo de tiempo muy limitado para monitorear la deformación de la superficie”.

Además, identificaron brechas técnicas y operativas, a continuación, se presentan algunas de estas.

- La mayoría de los operadores de depósitos de relaves están utilizando técnicas obsoletas de detección de puntos para monitorear sólo ubicaciones seleccionadas. Emplear nuevas técnicas para el monitoreo de áreas permitiría ubicar zonas problemáticas dentro de la presa.

- Faltan funciones automatizadas de alerta temprana. Estos sistemas permitirían tomar medidas de reducción de pérdidas por adelantado.
- No todos los modos de fallas se han abordado adecuadamente en las prácticas de monitoreo.
- Se necesitan sistemas resistentes y redundantes para cubrir la falla de sensores individuales y aumentar la confianza en las mediciones. En la actualidad, una vez instalados los instrumentos geotécnicos no se pueden recuperar ni calibrar, por lo que algunos instrumentos pueden proporcionar datos pocos confiables o incluso fallar durante la vida útil del depósito. Por este motivo, puede ser conveniente tener múltiples tecnologías para monitorear y validar un mismo parámetro.
- “La instrumentación de monitoreo es útil para recolectar un gran volumen y variedad de datos, sin embargo, no se comprende bien como relacionar estas diversas observaciones con el comportamiento general y estabilidad de la presa”.

### **2.9.2 Literatura chilena**

Zúñiga, et al (2021) evaluó el estado de la práctica en los sistemas de monitoreo en Chile a partir de información de 15 depósitos de relaves, 11 de los cuales están operativos y 4 inactivos. A continuación, se presentan las principales características:

- Varios grandes depósitos de relaves tienen sistemas de monitoreo robustos, en tiempo real y de alta frecuencia. Variables como niveles piezométricos, deformaciones, aceleraciones sísmicas, velocidades de partículas, temperatura, entre otras, son comúnmente monitoreadas.
- La mayoría de los depósitos cuentan con un equipo interno o subcontratado encargado de actualizar los registros de la instrumentación acorde con las frecuencias de medición definidas para cada instrumento, además de procesar la información con el fin de evaluar la estabilidad del depósito, la cual, en la mayoría de los casos se resume en un informe mensual.
- Todos los depósitos cuentan con instrumentos para el control de niveles piezométricos o presión intersticial. Mientras que los controles topográficos y batimétricos periódicos solo se identificaron en estructuras en funcionamiento activo.
- Los depósitos encuestados tienen planes y manuales de respuesta integrados. En la mayoría de los casos, el monitoreo está efectivamente vinculado a respectivas alertas de los instrumentos respectivos o niveles de activación. Sin embargo, un factor común fue la falta de integración de variables controladas/supervisadas (y los respectivos niveles de alerta) y los posibles mecanismos de falla.

### **3 Clasificación por Ventajas y Limitaciones de los Métodos y Técnicas de Monitoreo Geotécnico en Depósitos de Relaves**

En el presente capítulo se revisan los ventajas y limitaciones de cada uno de los métodos de monitoreo geotécnico revisados anteriormente. Esto con el objetivo de entender las principales diferencias entre los métodos y poder discernir entre la utilización de uno u otro dependiendo de las características específicas de cada proyecto de depósitos de relaves.

#### **3.1 Métodos invasivos**

A continuación, se presentan los métodos invasivos.

##### **3.1.1 Nivel freático y presiones de poros**

Usualmente estas variables geotécnicas son medidas a través de diversos tipos de piezómetros. En la Tabla 4 se presentan las ventajas y limitaciones.

**Tabla 4: Tabla de ventajas y limitaciones de piezómetros.**

Variable	Nivel freático y presiones de poros.	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
Piezómetro de Casagrande	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite medir el nivel freático o presiones de poros.</li> <li>• Fácil de construir con equipos y materiales fácilmente disponibles (Fell et al, 2015).</li> <li>• Duradero y confiable (Prasad &amp; Dixit, 2020).</li> <li>• Simple de monitorear y mantener (Clarkson, 2021).</li> <li>• Puede someterse a pruebas de carga ascendente y descendente para confirmar el funcionamiento (Clarkson, 2021).</li> <li>• De bajo costo (Clarkson, 2021).</li> <li>• Fácilmente automatizado (Clarkson, 2021).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja precisión (Clarkson, 2021).</li> <li>• En capas altamente permeables, el nivel de agua no puede estabilizarse durante varias semanas (Das, 2013).</li> <li>• Las puntas porosas pueden obstruirse debido a la repetida entrada y salida del agua (Clarkson, 2021).</li> <li>• Posibles problemas de congelamiento si el agua está cerca de la superficie (Clarkson, 2021).</li> <li>• Puede dañarse por la consolidación del suelo alrededor de la tubería vertical (Clarkson, 2021).</li> <li>• Las lecturas pueden verse afectadas por la escorrentía de agua de lluvia y la presión barométrica (Clarkson, 2021).</li> <li>• Interfiere con la colocación y compactación del material durante la construcción (Clarkson, 2021).</li> <li>• Puede ser problemático para instalaciones profundas, especialmente cuando se trata de confirmar la efectividad del sello de bentonita (Clarkson, 2021).</li> <li>• No es apropiado para condiciones artesianas donde la superficie freática se extiende significativamente por encima de la parte superior de la tubería (Clarkson, 2021).</li> </ul>
Piezómetro de Cuerda Vibrante (PCV)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite medir las presiones de poros o el nivel freático.</li> <li>• Es excelente para el monitoreo a largo plazo (Clarkson, 2021).</li> <li>• El procesamiento de datos es simple tanto manualmente como con automatización (Clarkson, 2021).</li> <li>• Puede automatizarse con lecturas continuas cuando se conecta a un registrador de datos, con tarjeta SIM para recuperación remota de datos (Clarkson, 2021).</li> <li>• Tiempo de retraso muy corto (cuando se instala utilizando el método de lechada total) (Clarkson, 2021).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite medir las presiones de poros y el nivel freático. Transductor de lectura costoso (Clarkson, 2021).</li> <li>• No es apropiado para largo plazo (Clarkson, 2021).</li> <li>• Sensibles a los cambios de temperatura y presión barométrica (Clarkson, 2021).</li> <li>• Los cables de alambre pueden dañarse por construcción, asentamiento o corrosión (Clarkson, 2021).</li> <li>• Imposible desairear dispositivos que tienen un depósito cerrado por tanto la medición será incorrecta. (Clarkson, 2021).</li> <li>• Los cálculos posteriores al procesamiento de datos pueden ser complicados si no se automatizan (Clarkson, 2021).</li> <li>• Requiere protección contra rayos eléctricos (Clarkson, 2021).</li> </ul>

### 3.1.2 Filtraciones

Para el monitoreo de filtraciones se ocupan tanto los piezómetros (ubicados en zonas particulares) como los aforadores de caudal (ubicados en el sistema de drenaje). En la Tabla 5 se analizan las ventajas y limitaciones del segundo.

**Tabla 5: Tabla de ventajas y limitaciones medidores de caudal.**

Variable	Caudal	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
Caudalímetro	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mide la cantidad de líquido que pasa a través del instrumento durante un periodo de tiempo (Clarkson, 2021).</li> <li>Permite medir volumen de fluido, velocidad de flujo y caudal másico (Clarkson, 2021).</li> <li>Requiere poco mantenimiento (Clarkson, 2021).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La contaminación de líquidos puede causar resultados inexactos en algunos dispositivos (Clarkson, 2021).</li> <li>Se requiere un espacio apreciable para las áreas de entrada/salida (Clarkson, 2021).</li> </ul>
Vertedero de aforo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Simple (Clarkson, 2021).</li> <li>Seguro (Clarkson, 2021).</li> <li>De bajo costo (Clarkson, 2021).</li> <li>Poco mantenimiento (Clarkson, 2021).</li> <li>Requerimientos mínimos de espacio en el punto de medición (Clarkson, 2021).</li> <li>Apto para lectura manual y monitoreo remoto.</li> <li>Permite el monitoreo de canales abiertos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pérdida de carga relativamente alta (Clarkson, 2021).</li> <li>Requiere un cambio de elevación suficiente para evitar que el agua de descarga sumerja el vertedero (Clarkson, 2021).</li> <li>Susceptible a daños u obstrucción por escombros (Clarkson, 2021).</li> <li>Susceptible a cambios o restricciones en el sistema hidráulico aguas abajo (Clarkson, 2021).</li> </ul>

### 3.1.3 Deformaciones

Para medir las deformaciones producidas en el muro del depósito se tienen diversos instrumentos, los cuales pueden ser usados para medir principalmente deformaciones verticales (asentamientos), deformaciones horizontales o posición absoluta (con la cual es posible obtener el cambio en la posición tanto vertical como horizontalmente con respecto a una posición inicial). Dependiendo el tipo de instrumento es posible medir deformaciones superficiales o internas (dentro del muro de contención).

En las siguientes tablas se presentan las ventajas y limitaciones de los diversos de métodos utilizados para monitorear esta variable separándolas por instrumentos que miden principalmente deformaciones internas (verticales, horizontales o ambas) y posiciones absolutas (puntuales superficiales)

**Tabla 6: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentos utilizados principalmente para monitorear deformaciones horizontales.**

Variable	Deformaciones horizontales	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
Inclinómetro deslizante	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mide los cambios graduales en la inclinación (AMTC, 2018).</li> <li>• Se utiliza para determinar los desplazamientos en el muro a diferentes profundidades (AMTC, 2018).</li> <li>• En taludes permiten determinar la localización y forma de la superficie de falla (Suarez, 2009).</li> <li>• Se puede programar la toma de datos (AMTC, 2018).</li> <li>• Se puede instalar de forma horizontal o inclinada (Suarez, 2009).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere realizar un sondaje.</li> <li>• El sondaje debe ser suficientemente profundo tal que alcance una zona estable (nivel de fundación).</li> <li>• Requiere de personal especializado para la instalación y calibración del instrumento.</li> <li>• Pueden tener una vida útil corta, ya que ante movimientos fuertes es posible que se produzca la rotura de la carcasa (AMTC, 2018).</li> <li>• No se puede monitorear en línea (AMTC, 2018).</li> <li>• Requiere de personal especializado para el análisis e interpretación de los resultados ya que existen diversas fuentes de error, como la utilización de escalas exageradas. (Suarez, 2009).</li> </ul>
Inclinómetro fijo (Shape Accel Array, SAA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite medir las deformaciones del suelo (Geo-observations, 2022).</li> <li>• Se puede obtener las mediciones en tiempo real (Geo-observations, 2022).</li> <li>• Se puede instalar de forma vertical, horizontal o inclinados (Geo-observations, 2022).</li> <li>• Su instalación es sencilla (Geo-observations, 2022).</li> <li>• Se puede volver a utilizar en otra ubicación (Geo-observations, 2022).</li> <li>• Se puede utilizar para activar alarmas (Geo-observations, 2022).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere realizar un sondaje</li> <li>• A medida que se compacta el material del muro el instrumento comienza a comprimirse pudiéndose llegar a romper (Bravo, 2022).</li> </ul>

**Tabla 7: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentos utilizados principalmente para monitorear deformaciones verticales.**

Variable	Deformaciones verticales	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
Extensómetro de Varilla	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite medir los desplazamientos o deformaciones del suelo o roca.</li> <li>• Permite controlar los desplazamientos a distintas profundidades.</li> <li>• Posee una alta precisión (Geotechdata, 2022).</li> <li>• Permite monitorear el desplazamiento a lo largo de los pozos en cualquier dirección (Geotechdata, 2022).</li> <li>• El monitoreo puede ser manual o remoto (Geotechdata, 2022).</li> <li>• Posee un bajo costo (Hui et al, 2017).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere una perforación para su instalación.</li> <li>• Para lograr una correcta medición, el instrumento debe estar anclado a un punto fijo normalmente al fondo del pozo, en caso contrario, las mediciones serán erróneas. (Geotechdata, 2022).</li> <li>• Posee un rango de medición limitado. Típicamente hasta 100 o 150 mm (Geotechdata, 2022).</li> </ul>
Celda de asentamiento de cuerda vibrante	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite monitorear los asentamientos del suelo de fundación.</li> <li>• La instalación es simple (no requiere de una perforación) (Geotechdata, 2022).</li> <li>• El sistema (celda y tubería) suele ser robusto, estable y confiable a largo plazo (Geotechdata, 2022).</li> <li>• La celda y los tubos al estar enterrados no interfieren con la construcción (Geotechdata, 2022).</li> <li>• Las mediciones casi no se ven afectadas por los desplazamientos laterales (Geotechdata, 2022).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las mediciones pueden verse afectadas por la temperatura del agua y la presión atmosférica (Geotechdata, 2022).</li> <li>• Sólo entrega información de un punto, por tanto, es posible que se requiera más de un instrumento para un monitoreo completo (Geotechdata, 2022).</li> </ul>

**Tabla 8: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentos utilizados principalmente para monitorear deformaciones internas (verticales y horizontales)**

Variable	Deformaciones internas (verticales y horizontales)	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
Clinoextensómetro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite controlar los desplazamientos verticales y horizontales a distintas profundidades.</li> <li>• Reacciona de forma instantánea a diferencia del extensómetro (Bravo, 2022).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere una perforación para su instalación.</li> <li>• Para lograr una correcta medición, el instrumento debe estar anclado a un punto fijo normalmente al fondo del pozo.</li> <li>• Cuando hay peraltamiento hay que proteger el cabezal para que no se dañe con la compactación del material (Bravo, 2022).</li> <li>• En el peraltamiento se debe limpiar los datos para no confundir las deformaciones asociadas a la compactación del material con asentamiento del muro (Bravo, 2022).</li> </ul>

**Tabla 9: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentos utilizados principalmente para monitorear deformaciones superficiales puntuales.**

Variable	Deformaciones (posiciones absolutas)	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
GPS/GNSS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determina la posición de un objeto (AMTC, 2018).</li> <li>• Funciona bajo cualquier condición climática (Clarkson, 2021).</li> <li>• Pueden ser monitoreados en línea (AMTC, 2018).</li> <li>• Alta precisión en distancias muy largas (Clarkson, 2021).</li> <li>• Los requisitos de energía pueden compensarse con el uso de energía solar.</li> <li>• Debido a sus características físicas es resistente al agua y a la temperatura lo que permite ubicarlo en entornos hostiles (Mssdefence, 2022).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende de la disponibilidad de satélites para la recopilación de datos.</li> <li>• Necesita visibilidad del cielo ya que no se puede operar en interiores (Clarkson, 2021).</li> <li>• Relativamente menos adecuado en comparación con la estación total automática cuando se requiere una gran cantidad de puntos (Clarkson, 2021).</li> </ul>
Prisma de control topográfico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sirve como punto de medición de otros instrumentos de medición topográfica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debe estar empotrado para entregar mediciones correctas.</li> <li>• Solo permite monitorear puntos superficiales.</li> <li>• Debe tener visibilidad directa con el instrumento de medición.</li> <li>• Es un instrumento complementario. No mide ningún parámetro por sí solo.</li> </ul>

### 3.1.4 Esfuerzos totales

Para la medición de esfuerzos totales el instrumento utilizado comúnmente es la celda de presión. En la Tabla 10 se presentan sus ventajas y limitaciones.

**Tabla 10: Tabla de ventajas y limitaciones de la Celda de presión.**

Variable	Esfuerzos totales	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
Celda de presión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite medir los esfuerzos totales.</li> <li>• Apto para monitorear de forma automática o manual (Clarkson, 2021).</li> <li>• Muy fiable y preciso (Clarkson, 2021).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La sobrecarga durante la compactación del suelo puede causar daños permanentes (Clarkson, 2021).</li> <li>• Cambiar la orientación al colocar relleno sobre la celda puede causar cambios en las lecturas (Clarkson, 2021).</li> <li>• Las concentraciones de tensión en los bordes de la celda pueden hacer que la celda se lea mal (Clarkson, 2021).</li> <li>• Sensible a los cambios de temperatura que hacen que el fluido interno se expanda a un ritmo diferente al del suelo circundante (Clarkson, 2021).</li> </ul>

### 3.1.5 Aceleraciones sísmicas

Para las monitorear aceleraciones producto de eventos sísmicos comúnmente se utilizan los acelerómetros. En la Tabla 11 se presentan las ventajas y limitaciones del del instrumento.

**Tabla 11: Tabla de ventajas y limitaciones del Acelerómetro**

Variable	Aceleraciones sísmicas	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
Acelerómetro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mide las aceleraciones verticales y horizontales (AMTC, 2018).</li> <li>• Permite registrar el historial de aceleraciones durante un evento sísmico (AMTC, 2018).</li> <li>• Puede ser monitoreado en línea (AMTC, 2018).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El costo es elevado en comparación a otros instrumentos.</li> <li>• Permite medir eventos sísmicos con magnitudes moderada y altas (MI&gt;3) (AMTC, 2018).</li> <li>• Debido a su complejidad requiere personal especializado (Clarkson, 2021)</li> <li>• Requiere un alto nivel de reserva de energía (Clarkson, 2021).</li> <li>• Las comunicaciones pueden interrumpirse durante un evento sísmico (Clarkson, 2021).</li> </ul>

### 3.1.6 Revancha

Para la medición de revancha física del muro en algunos depósitos se utilizan los limnímetros. En la Tabla 12 se presentan sus ventajas y limitaciones.

**Tabla 12: Tabla de ventajas y limitaciones del Limnímetro.**

Variable	Revancha	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
Limnímetro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite medir la revancha física del muro.</li> <li>• Es económico comparado con tecnologías más avanzadas.</li> <li>• No se requiere personal especializado para la instalación y posterior medición de datos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Al ser una placa de metal graduada es necesario ir a terreno a verificar el valor que marca.</li> <li>• Se requiere una gran cantidad de limnímetros debido a que se instalan sucesivamente a medida que el tamaño del depósito aumenta (AMTC, 2018).</li> <li>• Para lograr una correcta medición, la base debe estar empotrada. Sin embargo, los limnímetros se instalan en el muro, el cual se ve afectado por deformaciones y asentamientos. Esto puede generar variaciones en las mediciones.</li> </ul>

## 3.2 Métodos semi invasivos

A continuación, se presentan las ventajas y limitaciones de los métodos semi invasivos. Gran parte de estos métodos permite obtener una mayor densidad de datos, pero con una menor precisión que los métodos invasivos.

### 3.2.1 Volumen de agua en la laguna

Como se mencionó anteriormente, para medir el volumen de agua en la laguna de aguas claras se debe realizar un levantamiento batimétrico, el cual puede ser mediante un bote tripulado o no tripulado. En la Tabla 13 se presentan las principales ventajas del bote no tripulado con respecto al bote tripulado.

**Tabla 13: Tabla de ventajas y limitaciones del bote no tripulado en comparación al bote tripulado**

Variable	Volumen de agua en la laguna	
Instrumento	Ventajas con respecto al bote tripulado	Limitaciones respecto al bote tripulado
Bote no tripulado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de un operador (Geosoluciones, 2022).</li> <li>• Toma menor tiempo y costo (Geosoluciones, 2022).</li> <li>• Fácil de transportar.</li> <li>• La seguridad del personal es mucho mayor, debido a que evita el contacto con el agua contaminada y disminuye el tiempo de exposición a radiación solar (Geosoluciones, 2022).</li> <li>• Disponibilidad de las mediciones en tiempo real (Geosoluciones, 2022).</li> <li>• Elimina el error asociado al traspaso de datos de un equipo al otro (Geosoluciones, 2022).</li> <li>• Menor peso y calado que permiten la obtención de mediciones precisas en aguas someras (Geosoluciones, 2022).</li> <li>• Reducción del nivel de ruido y la contaminación ambiental, al utilizar uno o dos motores eléctricos (Geosoluciones, 2022).</li> <li>• Mayor confiabilidad en los datos entregados (Geosoluciones, 2022).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se encontraron limitaciones del bote no tripulado con respecto al bote tripulado en la literatura.</li> </ul>

### 3.2.2 Deformaciones

Los métodos semi invasivos presentados a continuación permiten monitorear las deformaciones a través de puntos individuales o de una nube de puntos. Estos métodos permiten en su mayoría realizar lecturas automáticas o semi automáticas disminuyendo considerablemente el error y tiempo asociado a toma de datos, además de disminuir el riesgo del personal a accidentes. Dependiendo del instrumento es posible obtener la visualización en tiempo real de la información recolectada, permitiendo un continuo manejo del riesgo a través de la generación de alarmas tempranas.

En las siguientes tablas se presentan sus ventajas y limitaciones.

**Tabla 14: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentación para el monitoreo de deformaciones.**

Variable	Deformaciones puntuales	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
Estación total automática	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mide ángulos verticales, horizontales y distancias.</li> <li>• Posee un alto nivel de precisión.</li> <li>• Requiere solo una persona para su funcionamiento a diferencia de la estación total manual.</li> <li>• Se puede controlar de forma remota.</li> <li>• Al ser automático, disminuye al mínimo la intervención humana y por tanto los errores.</li> <li>• Obtención de datos en un menor tiempo que otros equipos topográficos.</li> <li>• Permite la obtención de datos en tiempo real y la generación de alarmas (AMTC, 2018).</li> <li>• Monitoreo de largo alcance (Clarkson, 2021).</li> <li>• Permite realizar un seguimiento a mediano/largo plazo (Clarkson, 2021).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El instrumento es costoso (Clarkson, 2021).</li> <li>• No se debe utilizar en condiciones meteorológicas adversas puesto que afecta calidad de las mediciones. (Clarkson, 2021).</li> <li>• Debe tener visibilidad directa con el prisma (Clarkson, 2021).</li> </ul>

**Tabla 15: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentación para el monitoreo de deformaciones.**

Variable	Deformaciones (nube de puntos)	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
<p>Radar de Estabilidad de Taludes (SSR) con tecnología InRAR</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cobertura de área grande (Clarkson, 2021).</li> <li>• Escaneos rápidos (Clarkson, 2021).</li> <li>• Monitoreo a largo plazo y crítico/táctico (Clarkson, 2021).</li> <li>• Precisión relativamente alta de los algoritmos de corrección atmosférica (Clarkson, 2021).</li> <li>• Configuraciones fijas o móviles. (Clarkson, 2021).</li> <li>• Menos interferencia de la infraestructura de la mina en comparación a otros radares (Clarkson, 2021).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilidad de la línea de visión (Clarkson, 2021).</li> <li>• La presencia de vegetación densa en el muro genera ruido en los datos, lo que dificulta la detección de movimientos reales (Pimentel et al, 2021).</li> <li>• Los sistemas deben protegerse de las condiciones ambientales (el clima húmedo inhibe las mediciones) (Clarkson, 2021).</li> <li>• Puede requerir de un operador que mueva el satélite para poder abarcar toda el área requerida.</li> <li>• El tamaño de pixel aumenta con el alcance (Clarkson, 2021).</li> </ul>
<p>Radar de Estabilidad de Taludes (SSR) con tecnología InSAR</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escanea una área amplia y rápido (Clarkson, 2021).</li> <li>• Corrección atmosférica automática (Clarkson, 2021).</li> <li>• Capacidad de largo alcance sin comprometer significativamente la resolución (Clarkson, 2021).</li> <li>• Corregistra fotografías visuales con imágenes radar (Clarkson, 2021).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilidad de la línea de visión (Clarkson, 2021).</li> <li>• Precisión de los datos en áreas con vegetación (&gt;5 cm) (Clarkson, 2021)</li> <li>• Menor precisión que otros métodos (Clarkson, 2021).</li> <li>• Instalación fija (Clarkson, 2021).</li> <li>• Los sistemas deben protegerse de las condiciones ambientales (el clima húmedo inhibe las mediciones) (Clarkson, 2021).</li> <li>• Datos casi en tiempo real, actualizados cada 1-3 minutos (Clarkson, 2021).</li> </ul>
<p>Escáner Láser</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite generar una imagen 3D a partir de una nube de puntos.</li> <li>• Su precisión es milimétrica (Geocom, 2022).</li> <li>• La recopilación de datos es rápida (3space, 2022).</li> <li>• No requiere de un prisma para las mediciones (Lienhart, 2017).</li> <li>• Al ser automático, disminuye al mínimo la intervención humana y por tanto los errores.</li> <li>• Puede tomar imágenes para proporcionar colores a los puntos recopilados. (egv, 2022).</li> <li>• Puede ubicarse en una plataforma estable como un trípode o un pilar o sobre una plataforma móvil como un automóvil o dron. (Lienhart, 2017).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El costo del instrumento y del software es alto (egv, 2022).</li> <li>• El procesamiento de un gran volumen de información recopilada requiere tiempo y un ordenador de gran capacidad (egv, 2022).</li> <li>• El material, las condiciones de la superficie, la rugosidad de la superficie y el ángulo de inclinación entre la superficie y el rayo láser pueden degradar la precisión alcanzable. (Lienhart, 2017).</li> <li>• Las condiciones meteorológicas pueden afectar la calidad de las mediciones.</li> <li>• Debido a que el instrumento lee la luz de un láser para registrar los datos, la luz ambiental puede mezclarse con el láser e interferir con la precisión del escaneo. (3space, 2022).</li> </ul>

### 3.2.3 Filtraciones

Las filtraciones normalmente se monitorean a través de piezómetros o aforadores de caudal. Sin embargo, durante los últimos años se han realizado investigaciones que proponen la utilización de los métodos geofísicos como la Tomografía de resistividad eléctrica (ERT) para el monitoreo de las filtraciones de forma continua. En la Tabla 16 se presentan las ventajas y limitaciones de este método.

**Tabla 16: Tabla de ventajas y limitaciones de la Tomografía de resistividad eléctrica (ERT)**

Variable	Filtraciones	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
Tomografía de resistividad eléctrica (ERT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite obtener el nivel freático y la ubicación de la roca basal (Bery, 2016).</li> <li>• La medición está asociada a área.</li> <li>• Su alcance es de hasta de 200m de profundidad y +3000m de longitud (Córdova &amp; Bari, 2021).</li> <li>• Permite identificar fugas, filtraciones, formaciones de fracturas y diferentes contenidos de agua. (Córdova &amp; Bari, 2021).</li> <li>• Proporciona información sobre la homogeneidad del suelo (Mainali et al, 2015).</li> <li>• A partir de correlaciones empíricas es posible obtener diversas propiedades mecánicas del suelo, tales como la resistencia al corte, contenido de humedad, índice de vacíos, la porosidad, el grado de saturación y límites de Atterberg. (Bery, 2016).</li> <li>• Es posible realizar monitoreo permanente donde la adquisición de datos se puede manipular remotamente (Córdova &amp; Bari, 2021).</li> <li>• El sistema trabaja sin la intervención humana en campo (si se instala permanentemente).</li> <li>• Permite obtener un conjunto de datos denso del subsuelo (Mollehuara et al, 2021).</li> <li>• No necesita de un geofísico para determinar los valores de isoresistividad (Bravo, 2022).</li> <li>• El voltaje al ser bajo no daña a animales ni personas (Bravo, 2022).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diferentes tipos de matrices generan diferentes resultados sobre el mismo objetivo. (Bery, 2016).</li> <li>• Requiere de energía para su aplicación, la cual es difícil de obtener en zonas centrales de Chile (Bravo, 2022).</li> <li>• Cuando se realiza el peraltamiento el sistema queda enterrado (Bravo, 2022).</li> </ul>

### 3.2.4 Condiciones climáticas

En la Tabla 17 se presentan las ventajas y limitaciones de la Estación Meteorológica Automática.

**Tabla 17: Tabla de ventajas y limitaciones de la Estación Meteorológica Automática**

Variable	Clima	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
Estación meteorológica automática	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mide y registra diferentes variables meteorológicas.</li><li>• Permiten elaborar predicciones y hacer estudios climáticos (AMTC, 2018).</li><li>• Las variables pueden ser medidas en línea y de manera continua lo que permite mantener un monitoreo constante de las condiciones meteorológicas (AMTC, 2018).</li><li>• La frecuencia usual de medición es de cada 1 hora (AMTC, 2018).</li><li>• Como las mediciones no se realizan por un operador, el error asociado a la toma de datos es mínimo.</li><li>• Se puede mantener un registro histórico de las condiciones climáticas de la zona.</li><li>• Los requisitos de energía pueden compensarse con el uso de energía solar (Clarkson, 2021).</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• El precio de estos instrumentos es elevado en comparación a otros instrumentos.</li><li>• Debido a su complejidad requiere personal especializado.</li><li>• Los sensores pueden verse afectados por las condiciones climáticas de la zona, por lo que es necesario un adecuado mantenimiento de tal forma de asegurar la calidad de los datos (Kremer, 2016).</li></ul>

### 3.3 Métodos no invasivos

En la actualidad, los métodos invasivos para el monitoreo de variables en depósitos son pocos.

#### 3.3.1 Deformaciones

Para el monitoreo de deformaciones se ha desarrollado la tecnología LiDAR e InSAR. Con ambos métodos se puede obtener información de gran densidad a través de una nube de puntos, permitiendo monitorear grandes áreas. Esto los hace una excelente herramienta para el monitoreo de taludes en los muros de contención dado el tamaño de estas estructuras. A continuación, se presentan las ventajas y limitaciones de ambos métodos.

**Tabla 18: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentación utilizada para el monitoreo de deformaciones.**

Variable	Deformaciones	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
Light Detection and Ranging (LiDAR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite obtener una nube de puntos tridimensionales (Oommen et al, 2019).</li> <li>• Posee una precisión de ubicación relativamente alta (&lt;2 cm) (Oommen et al, 2019).</li> <li>• La obtención de datos es rápida (Clarkson, 2021).</li> <li>• Alta densidad superficial (número de puntos levantados) (Clarkson, 2021).</li> <li>• La medición de datos puede ser terrestre, aérea o satelitales (Clarkson, 2021).</li> <li>• Puede penetrar la cubierta vegetal (Clarkson, 2021).</li> <li>• Se puede usar de día y de noche (Clarkson, 2021).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altos costos operativos cuando se miden áreas relativamente pequeñas (Clarkson, 2021).</li> <li>• Afectado por refracción durante fuertes lluvias o nubes bajas (Clarkson, 2021).</li> <li>• Conjunto de datos muy grandes y por tanto difícil de interpretar (Clarkson, 2021).</li> <li>• No puede penetrar vegetación espesa (donde tampoco penetra la luz) (Clarkson, 2021).</li> <li>• Altitud de funcionamiento limitada a 2000 m (Clarkson, 2021).</li> <li>• No apto para presas de relaves construidas con el método de aguas abajo debido a su constante expansión hacia el exterior (Clarkson, 2021).</li> </ul>
Sistema de Radar de Apertura Sintética Interferométrica (InSAR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se utiliza para monitorear los desplazamientos de taludes.</li> <li>• Permite predecir fallas de taludes.</li> <li>• Alcanza una precisión de 1 milímetro (AMTC, 2018).</li> <li>• Las mediciones están asociadas a áreas de control.</li> <li>• Bajo costo (especialmente si se utilizan datos satelitales de fuente abierta) (Clarkson, 2021).</li> <li>• Al ser remoto, no requiere de mantenimiento ni instalaciones (Clarkson, 2021).</li> <li>• Sin necesidad de calibración de datos (Clarkson, 2021).</li> <li>• Puede integrarse con otros datos de medición (tanto para comprensión como para calibración) (Clarkson, 2021).</li> <li>• Posee una muy alta densidad de medición de datos (Clarkson, 2021).</li> <li>• Sin interrupción del servicio, con informes regulares posibles (Clarkson, 2021).</li> <li>• Funciona bajo cualquier condición meteorológica (AMTC, 2018).</li> <li>• Permite monitorear una mayor área de control que el radar terrestre (visualización sobre y aguas arriba del muro).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende de la disponibilidad de satélites internacionales para la recopilación de datos (AMTC, 2018).</li> <li>• Frecuencia de escaneos limitada a una vez cada 16, 11, 8 e incluso 4 días dependiendo del satélite (Colombo &amp; Macdonald, 2015).</li> <li>• Línea de visión única (Clarkson, 2021).</li> <li>• Cambios significativos en la cobertura del suelo entre cada adquisición de imágenes (por ejemplo, vegetación) (Clarkson, 2021).</li> <li>• La presencia de vegetación densa limita la densidad de los puntos de medición (Clarkson, 2021).</li> <li>• Visibilidad limitada en áreas inclinadas (Clarkson, 2021).</li> <li>• Sensibilidad a la deformación vertical y horizontal tierra oeste (Clarkson, 2021).</li> </ul>

**Tabla 19: Tabla de ventajas y limitaciones de instrumentación utilizada para el monitoreo de deformaciones.**

Variable	Deformaciones	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
Fotogrametría	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite producir modelos tridimensionales de alta calidad de las superficies reflejadas por cámaras (Oommen et al, 2019).</li> <li>• Permite obtener los datos de forma rápida.</li> <li>• Permite ver las características de la superficie terrestre en su contexto espacial (Lillesand et al, 2015).</li> <li>• Con los datos de referencia adecuados, se pueden obtener medidas precisas de posiciones, distancias, direcciones, áreas, alturas, volúmenes y pendientes. (Lillesand et al, 2015).</li> <li>• Puede usarse para detectar desplazamientos a gran escala de taludes (Oommen et al, 2019).</li> <li>• Es una alternativa menos costosa en comparación a la tecnología LiDAR y equipos topográficos (Oommen et al, 2019).</li> <li>• Las imágenes se pueden obtener por medio de un dron, permitiendo estudiar zonas de difícil acceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No es posible realizar el levantamiento en ausencia de luz.</li> <li>• Estos modelos se basan en buenas calibraciones de la cámara y puntos de control del suelo para producir resultados precisos que representen la superficie estudiada. (Oommen et al, 2019).</li> <li>• La precisión disminuye ante lluvia, nieves o la presencia de vegetación.</li> <li>• Posee un menor nivel de precisión que otros métodos, como los topográficos.</li> </ul>

### 3.3.2 Otros

Estos métodos pese a que no miden directamente una variable geotécnica permiten conocer a mayor profundidad el estado del depósito.

**Tabla 20: Tabla de ventajas y limitaciones de métodos a través de la toma de imágenes.**

Variable	Otros	
Instrumento	Ventajas	Limitaciones
Imágenes Hiperespectrales (HSI)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite determinar distintas variables, como la densidad, temperatura y humedad (Araya et al, 2019).</li> <li>• Tecnología precisa y costo-eficiente para la estimación de humedad (Araya et al, 2019).</li> <li>• Conocer el contenido de agua permite estudiar otras variables o fenómenos, como el balance de agua, tasas de evaporación y riesgo de licuefacción. (Araya et al, 2019).</li> <li>• Es económica en comparación a otras técnicas que requieren de mediciones in situ (Araya et al, 2019).</li> <li>• Las imágenes se pueden obtener por medio de un dron, permitiendo estudiar zonas de difícil acceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usan el sol como fuente de energía (Araya et al, 2019), por lo que solo son relevantes sin nubosidades y con luz de día.</li> </ul>
Imágenes térmicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite conocer la temperatura de una superficie a partir de la energía radiante infrarroja térmica de los objetos.</li> <li>• Permite conocer el contenido de humedad superficial (Zwissler et al, 2017).</li> <li>• Permite ubicar zonas potencialmente inestables en taludes (Chen &amp; Liu, 2017).</li> <li>• Es adecuada tanto para el monitoreo a largo plazo como para inspección a corto plazo (Chen &amp; Liu, 2017).</li> <li>• Pueden funcionar en cualquier momento del día o de la noche, puesto que no dependen de la radiación solar reflejada (Lillesand et al, 2015)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se encontraron limitaciones en la literatura.</li> </ul>

## **4 Estado de la Práctica Respecto a la Instrumentación y Monitoreo en Depósitos de Relaves Chilenos**

Para proponer una metodología de instrumentación geotécnica de depósitos de relaves avanzada, es necesario primero entender el estado de la práctica de esta misma, y en base a los avances tecnológicos realizados este último tiempo, generar una metodología que realmente pueda contribuir al área. A continuación, se revisa la normativa chilena actual e información recolectada sobre el estado de la práctica de la instrumentación y monitoreo geotécnico en depósitos de relaves chilenos.

### **4.1 Normativa chilena**

Desde el 2007 hasta comienzos del 2022, el monitoreo geotécnico de depósitos de relaves estaba normado por el Decreto Supremo N°248 (2007) denominado “Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves”. Sin embargo, durante la realización de esta Memoria de Título fue aprobado el nuevo Decreto Supremo N°35 (2022). A continuación, se presenta un punteo de los temas relevantes para esta Memoria de título de ambos reglamentos.

#### **4.1.1 Decreto supremo N°248**

Según el Artículo 1, el decreto tiene por objetivo fijar normas sobre:

- Procedimientos para la aprobación de los proyectos de depósitos de relaves mineros.
- Requisitos de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves mineros y la disposición de sus obras anexas que garanticen la seguridad de las personas y de los bienes.

Con respecto a los sistemas de instrumentación y control que se usarán para monitorear el comportamiento estructural e hidráulico del depósito, el Artículo 14 indica que se deben incluir las siguientes variables:

- Presiones de poros.
- Niveles freáticos.
- Desplazamientos.
- Asentamientos.
- Filtraciones.
- Aceleraciones sísmicas.
- Otras recomendadas por el profesional a cargo del proyecto.

En el Artículo 14 se menciona que se debe incluir el Análisis de estabilidad de Taludes para el diseño del depósito de relaves en sus etapas de operación y cierre, incluyendo diferentes fases de precisión según la importancia y la evaluación de los riesgos que el depósito pueda presentar para las áreas adyacentes. Las fases son las siguientes:

**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 a 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.

El sismo de diseño considerado debe obtenerse a partir de las estadísticas de las zonas sismológicas de la región y estimar la aceleración máxima respectiva en la zona de emplazamiento del depósito.

El Artículo 30 solicita que el usuario envíe al Servicio un informe trimestral sobre la operación y mantención de depósitos de relaves, en formularios establecidos para efecto por el servicio.

Según el Artículo 48, en el caso de los tranques de relaves, la laguna de aguas claras debe mantenerse lo más alejada posible del muro de contención con el fin de evitar su saturación, y el consecuente aumento de la presión de poros y el eventual colapso.

El Artículo 49 indica que la revancha en los depósitos de relaves debe ser, como mínimo, de 1 metro.

Con respecto al muro, en el Artículo 50 se indica que el coronamiento debe tener un ancho que asegure la estabilidad del muro, el cual debe ser, como mínimo, de a lo menos 2 metros, mientras que el Artículo 53 menciona que el muro debe contar con un sistema drenante en su base.

En el Artículo 52 se menciona que el operador deberá monitorear y controlar las instalaciones para verificar que ellas cumplan las especificaciones y requerimientos impuestos por las respectivas Autoridades Fiscalizadoras.

Finalmente, en el Artículo 56 se indica que el sistema de impermeabilización del fondo de la cubeta de los tranques y embalses de relaves o del área donde se depositan los relaves espesados, de ser necesario, deberá contemplar un tratamiento previo del terreno utilizado, por ejemplo, recubrimientos compactados compuestos con materiales del tipo arcilloso y otros con propiedades impermeabilizantes, o cualquier otro método (en el caso del Tranque de Relaves no es permitido el uso de una geomembrana), para impedir o minimizar filtraciones de agua contaminadas al exterior del depósito o infiltraciones a cursos de aguas subterráneas.

#### **4.1.2 Decreto supremo N°35**

Según el Artículo 1, el decreto tiene por objetivo fijar normas sobre:

- Requisitos y procedimiento de aprobación de proyectos de disposición y almacenamiento de relaves o sus modificaciones significativas, en adelante el “Proyecto de Depósito de relaves o el “Proyecto”. Lo anterior, con el objetivo de asegurar la estabilidad física y química del depósito en todas sus etapas de construcción, operación y cierre, resguardando la seguridad de las personas y del medio ambiente.
- Las disposiciones y requisitos para el diseño, construcción, operación, cierre y monitoreo integral de los depósitos de relaves.
- Los requisitos de los proyectos de reprocesamiento y/o explotación de relaves que requieran de obras de almacenamiento.
- Las condiciones y requisitos específicos que debe cumplir el diseño de Depósito de Relaves en cuanto a su estabilidad física y química para los periodos de construcción, operación y cierre del depósito conforme señalan la Ley N°20.551, el Decreto Ley N°3.525, el Código de Minería y la ley N°18.097 Orgánica Constitucional de Concesiones Mineras.
- Las consideraciones para la implementación de un Sistema de Gestión del Depósito de Relaves que integre la planificación, la evaluación del desempeño, el registro y la presentación de la información, así como la preparación y la capacidad de respuesta ante eventos inesperados, entre otras; permitiendo la ejecución de las actividades de generación, disposición y almacenamiento de relaves con una efectiva gestión del riesgo.
- Los requisitos, condiciones y plazos para que depósitos de relaves existentes cumplan con lo estipulado en el presente reglamento.

El Artículo 15 establece la siguiente Clasificación por Tipos de Depósitos de Relaves:

**Tabla 21: Clasificación por Tipo de Depósito de Relaves.**

<b>Tipo</b>	<b>Método de almacenamiento</b>
<b>Tipo I</b>	Depósitos de relaves convencionales constituidos por muros de arenas de relaves o materiales de empréstito compactados siguiendo método de construcción de aguas abajo o eje central. Asimismo, incluirá depósitos de relaves espesados, en pasta o filtrados
<b>Tipo II</b>	Depósitos de relaves conformados siguiendo otras metodologías no consideradas en el tipo I, por ejemplo, disposición interior mina, codisposición o mezcla con otros residuos mineros, disposición de relaves sobre depósitos de relaves existentes, entre otras.

El Artículo 16, se indica que a los depósitos se les asignará un nivel de consecuencias según el potencial impacto que generaría la ocurrencia hipotética de una falla del Depósitos de Relaves en seguridad y salud de las personas y/o del medio ambiente. Para cumplir con esta clasificación, se deberá realizar un Estudio de Rotura del Depósito de Relaves (ERD) que permita determinar el área de inundación potencial considerando mecanismos de fallas creíbles.

El artículo 17 menciona que, para fines de clasificación por categoría del depósito, el nivel de consecuencias podrá ser, en orden creciente, determinado como “Bajo”, “Medio”, “Alto”, “Muy alto” según los criterios indicados en la Tabla 22. El nivel de consecuencias se establece verificando cada uno de los “criterios de impacto o daño en el área de inundación”. El nivel más alto en cualquiera de estos criterios se identifica como el nivel de consecuencias del Depósito de Relaves.

**Tabla 22: Nivel de Consecuencias del Proyecto de Depósitos de Relaves, Decreto Supremo N°35, 2022.**

Criterio de impacto o daño en el área de inundación	Nivel de Consecuencias			
	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Número de personas a evacuar	0-10 personas	11-100 personas	101-1000 personas	> 1000 personas
Daño inhabilitante de infraestructura	Servicios e infraestructura menor (camino de acceso locales o rurales, línea de transmisión, etc.)	Servicios e infraestructura de importancia comunal (carreteras, empresas, sanitarias, etc.)	Servicios e infraestructura de importancia regional (carreteras interurbanas, hospitales, parque industrial, redes de agua potable, centrales generadoras de energía, etc.)	Servicios e infraestructura de importancia nacional (autopista, líneas férreas, complejo industrial, transmisión eléctrica, embalses o presas, etc.)
Área de Inundación	<1km <sup>2</sup>	<5 km <sup>2</sup>	<20 km <sup>2</sup>	≥ 20 km <sup>2</sup>
Pérdida o deterioro del medio ambiente y ecosistemas	No afecta a cuerpos de agua superficiales, con usuarios identificados	Afecta a cuerpos de agua superficiales con usuarios identificados.	Afecta a cuerpos de aguas superficiales con usuarios identificados y que tienen usos antrópicos o áreas colocadas bajo protección oficial.	Afecta de forma relevante a cuerpos de aguas superficiales con usuarios identificados y que tienen usos antrópicos y/o áreas colocadas bajo protección oficial.

Según la Clasificación por Categoría del Depósitos de Relaves (ver Tabla 23) mencionada en el artículo 18 los depósitos clasifican como Categoría 1, 2, 3 o 4; en función de la altura máxima o volumen autorizado por el Servicio y su Nivel de Consecuencias.

**Tabla 23: Clasificación por Categoría de Depósito de Relaves según Nivel de Consecuencias y Clasificación por Envergadura del Depósito de Relaves, Decreto Supremo N°35, 2022.**

Clasificación por Envergadura del Depósito de Relaves	Nivel de Consecuencias			
	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
$H_{m\acute{a}x} \leq 5$ m o Volumen almacenado menor o igual a 50.000 m <sup>3</sup>	Categoría 4	Categoría 3 o Categoría 4	Categoría 2	Categoría 1
$5 \text{ m} \leq H_{m\acute{a}x} \leq 15$ m o Volumen almacenado menor o igual a 1.500.000 m <sup>3</sup>	Categoría 3 o Categoría 4	Categoría 3	Categoría 2	Categoría 1
$15 \text{ m} \leq H_{m\acute{a}x} \leq 30$ m o Volumen almacenado menor o igual a 20.000.000 m <sup>3</sup>	Categoría 3	Categoría 2	Categoría 1	Categoría 1
$30 \text{ m} < H_{m\acute{a}x} \leq 60$ m o Volumen almacenado menor o igual a 60.000.000 m <sup>3</sup>	Categoría 2	Categoría 2	Categoría 1	Categoría 1
$H_{m\acute{a}x} > 60$ m o Volumen almacenado mayor a 60.000.000 m <sup>3</sup>	Categoría 1	Categoría 1	Categoría 1	Categoría 1

Los depósitos de relaves Tipo II serán automáticamente clasificados como Categoría 1.

Según el Artículo 19, esta clasificación permite determinar los requerimientos mínimos asociados a la selección de sitio, caracterización de materiales, campañas de prospección geológico-geotécnica, consideraciones sísmicas, condiciones hidrológicas e hidrogeológicas de diseño, entre otras.

En el Artículo 21 se señala que el Usuario debe demostrar que se implementarán tecnologías sustentables y las mejores prácticas disponibles a nivel nacional e internacional, que el usuario pueda implementar y que aseguren la gestión de riesgo asociado al depósito, preservando la estabilidad física y química de la obra. El usuario debe implementar los avances en el estado del conocimiento y la práctica nacional en cuanto a la ingeniería sísmica, geotécnica, hidrogeológica e hidráulica en todas las etapas del Depósito de Relaves.

En el Artículo 23, se mencionan los componentes mínimos del Sistema de Gestión de Depósitos de Relaves. De estos componentes se destacan el Informe de Estabilidad Física Actualizado, Informe de Monitoreo Integral Actualizado y el Estudio de Rotura de Depósitos de Relaves Actualizado.

En el Artículo 27 se indica que los depósitos de Categoría 1, 2 o 3 deberán contar con un Ingeniero de Registro (IdR) externo o interno a la empresa minera el cual deberá poseer una experiencia proporcional a la categoría del depósito. El IdR será el encargado de verificar que el depósito se encuentre diseñado, construido y operado conforme al Proyecto de Depósito de Relaves, a los

compromisos de Cierre y/o las modificaciones significativas aprobadas por el Servicio. También es responsable de que se registren y se completen todos los antecedentes e informes técnicos relativos al diseño, construcción, operación y monitoreo del depósito.

Con respecto al sistema de instrumentación que se usará para el monitorear el comportamiento estructural, hidráulico, químico y medioambiental del Depósitos de Relaves, el Artículo 48 indica que se debe realizar una descripción del sistema junto a un cronograma de implementación de dicha instrumentación, el cual indique las etapas de ampliación/crecimiento de la instrumentación.

El Artículo 54 indica que el usuario debe contar con un Plan de monitoreo Integral (PMI) que permita evaluar la condición de estabilidad física y química de los depósitos de relaves. Este plan deberá incluir variables, procedimientos, metodologías, herramientas, tecnologías u otras actividades. El monitoreo integral considera la caracterización del depósito a partir de mediciones de sensores in-situ y/o remotos, la caracterización de materiales mediante prospecciones, muestreo o pruebas de laboratorio, así como el procesamiento de la información y el análisis estadísticos de resultados tanto en el espacio del depósito como en el tiempo. El usuario deberá definir los límites tolerables o umbrales de los sistemas de monitoreo integral para una o más variables.

Con respecto al control de emergencias que superen las medidas preventivas según el Artículo 60, el Usuario deberá presentar al Servicio un Plan de Preparación ante Emergencias, el que se aplicará en las etapas de construcción y operación del Depósito de Relaves.

Según el Artículo 68 el Proyecto de Depósitos de Relaves deberá considerar el desarrollo de un Estudio de Estabilidad Física de Depósito de Relaves para los hitos de crecimiento presentados en el proyecto y para la etapa de cierre bajo condiciones estáticas y sísmicas. El estudio deberá describir y dar sustento a los criterios de diseño adoptados y a los parámetros o condiciones consideradas en los análisis. Además, deberá analizar la susceptibilidad del depósito a la ocurrencia del fenómeno de licuación estática o sísmica. En caso de resultar sectores con potencial de licuefacción, se debe definir la resistencia post licuefacción (resistencia residual no drenada).

En el Artículo 69 se solicita desarrollar un análisis de infiltraciones que permita establecer los efectos de gradientes hidráulicos, presiones de poros, entre otros.

Según el Artículo 70, la solicitud sísmica para el diseño del Depósito de Relaves y todas sus obras anexas se deberá asociar al Sismo de Operación, y/o al Sismo Máximo Creíble según la Clasificación por Categoría de Depósito de Relaves.

El artículo 74 indica que el Usuario deberá verificar que, los niveles máximos de agua durante la crecida no excedan aquellos que el muro y revanchas admiten, además que los niveles máximos de la laguna de decantación y su cercanía a primas resistentes no pongan en riesgo la estabilidad física del depósito. Lo anterior, considerando las obras hidráulicas, de manejo de infiltraciones y de recuperación de agua que el diseño del depósito considera.

Según el Artículo 77, para depósitos Tipo I, la revancha hidráulica mínima del prisma resistente se definirá a partir de la suma de los siguientes factores:

1. Efecto del viento sobre la laguna de decantación.
2. Asentamiento por consolidación del muro y/o de su fundación.
3. Asentamiento dinámico causado por el sismo de diseño.
4. Cualquier otro efecto o fenómeno particular de respuesta que resulte en disminución de la revancha hidráulica.

Cuando del cálculo se obtengan valores inferiores a 1,0 metro se debe adoptar 1,0 metro.

Depósitos de relaves Categoría 3 y Categoría 4, podrán adoptar la revancha hidráulica mínima igual a 1,5 metros, sin necesidad de cálculos.

El Artículo 79 menciona que como parte del Plan de Monitoreo Integral el titular deberá proponer y materializar en el depósito instrumentación necesaria para llevar un control de las variables de diseño relacionadas al balance de aguas.

En el Artículo 80, se indica que la distancia de la laguna de aguas claras al (o los) muro(s) del depósito durante todas las etapas del Depósito de relaves, debe ser lo suficientemente alejada de las estructuras resistentes del depósito, de modo de asegurar la estabilidad física y química de la estructura. El usuario deberá, justificadamente, establecer cuál es la distancia mínima menor entre la traza de la laguna de decantación y los prismas resistentes que cumplen con el objetivo anterior.

Según el Artículo 82, para el Estudio de Rotura de Depósitos de Relaves (ERD) se requiere la identificación de los modos de falla cañbles del depósito para dos escenarios, la Falla Operacional y la Falla por hidrología extrema. La Falla Operacional ocurre bajo condiciones normales de operación, la que puede ser causada por erosión interna, tubificación, mal funcionamiento de los drenes, agrietamiento del muro o rotura, asentamientos por eventos sísmicos, mala operación con consecuencias de rebalse, u otro evento. La Falla por Hidrología extrema es resultante de una inundación natural de magnitud superior a la de diseño. Según el Artículo 83, el ERD debe considerar al menos las siguientes etapas de desarrollo:

1. Etapa 1: Identificación y evaluación de los mecanismos que gatillan la inestabilidad y modos de falla creíbles.
2. Etapa 2: Dimensión de la brecha y evaluación del volumen de relaves, prisma resistente y/o aguas claras liberados.
3. Etapa 3: Caudal de material máximo liberado y tiempo de formación de la brecha.
4. Etapa 4: Determinación del área de inundación.

En el artículo 94 se menciona que los avances y resultados de la operación del depósito deberán ser descritos en el informe de Operación actualizado (IOA), el que deberá describir, para el periodo

de registro correspondiente, entre otros, la presentación de variables críticas de operación, tales como la revancha, revancha hidráulica, ubicación de la laguna de decantación respecto a muros, cotas de prismas resistentes, pendiente de playas, entre otros.

## **4.2 Programa Tranque**

Como parte de las actividades del Programa Tranque, en 2018 se investigó el estado del arte de métodos de medición de parámetros necesarios para la evaluación de la estabilidad en depósitos de relaves. A continuación, se presenta una síntesis del informe realizado que incluyó una búsqueda exhaustiva en la literatura abierta tanto nacional como internacional de las distintas tecnologías existentes o en desarrollo para la medición de las variables requeridas para evaluar la estabilidad física. El programa consideró depósitos de relaves de cualquier tamaño durante cualquier etapa de su vida útil.

Para el desarrollo del informe, se revisó la instrumentación de algunos de los depósitos más importante de Chile. Además, se identificaron los distintos métodos e instrumentos que existen en el mercado, su uso, y se evaluó la madurez en aplicaciones de depósitos de relaves.

A continuación, se presenta el estado del arte de la instrumentación en los depósitos de relaves. Se incluye para cada método de medición los parámetros que miden, el formato de medición, la frecuencia usual de medición y la madurez de la tecnología.

La Tabla 24 presenta los métodos invasivos para el monitoreo de depósitos.

**Tabla 24: Estado del arte de la instrumentación geotécnica invasiva en depósitos de relaves.  
(Modificado de AMTC, 2018)**

<b>Método de medición</b>	<b>Parámetro que mide</b>	<b>Formato de medición</b>	<b>Frecuencia usual de medición</b>	<b>Madurez tecnología</b>
<b>Piezómetro</b>	Presiones de agua, filtraciones y flujos	Discreto de manera automática	1 hora 1 día 1 semana	Avanzado
<b>Inclinómetro</b>	Movimientos internos	Discreto	Diarias, semanales, mensuales	Avanzada en otros campos. En depósitos de relaves ha sido aplicada en embalses.
<b>Extensómetro</b>	Desplazamientos superficiales e internos	Continuo o discreto	No existe una frecuencia predominante de medición	Medio, debido a la poca utilización en depósitos de relaves
<b>Limnómetro</b>	La revancha física del muro	Discreta	Semanales, mensuales	Básico
<b>Celdas de asentamientos</b>	Movimientos internos	En línea	1 hora	Alto. Sin embargo, su aplicabilidad en depósitos de relaves es reducida
<b>Celdas de presión</b>	Esfuerzos	Discreta. No se puede realizar de forma remota.	No se tiene información al respecto	Alto. Sin embargo, su aplicabilidad en depósitos de relaves es reducida
<b>Caudalímetro</b>	Flujos	Continua	No se tiene información al respecto	Avanzada. Principalmente por su amplia utilización en depósitos de relaves.
<b>Acelerómetro</b>	Aceleraciones sísmicas	En línea	Durante eventos sísmicos	Alto. Sobre todo, en lugares con una alta tasa de eventos sísmicos
<b>GPS</b>	Desplazamientos horizontales	En línea	1 hora	Avanzado, debido a su gran rango de aplicación en depósitos de relaves.
<b>Instrumentos de medición topográficos</b>	Movimientos superficiales	Discreto	Usualmente un par de horas	Avanzado. Es la forma de medición de movimientos superficiales más utilizada en depósitos de relaves.

En la Tabla 25, se presentan los métodos semi invasivos revisados por el Programa Tranque.

**Tabla 25: Estado del arte de la instrumentación geotécnica semi invasiva en depósitos de relaves (Modificado de AMTC, 2018)**

Método de medición	Parámetro que mide	Formato de medición	Frecuencia usual de medición	Madurez tecnología
<b>Levantamiento batimétrico</b>	Elevación de relaves y laguna	En línea de manera continua	No tienen frecuencia usual de medición	Media. La tecnología está avanzada pero su aplicación aún es baja.
<b>Radar de estabilidad de taludes</b>	Los desplazamientos	En línea	No se tiene información al respecto	Medio
<b>Tomografía de resistividad eléctrica (ERT)</b>	Filtraciones y fugas en membranas	Discreto	No se tiene información al respecto	Alta. Sin embargo, su aplicación a depósitos de relaves es baja, y en Chile es nula
<b>Estación meteorológica automática</b>	Precipitaciones, radiación solar, humedad relativa, temperatura del aire y del suelo, dirección y velocidad del viento, evaporación	En línea	1 hora	Alto. Sin embargo, su aplicabilidad en depósitos de relaves es reducida
<b>Drones</b>	Capturas de imágenes	En línea y de manera continua	1 mes	Alto. Sin embargo, su aplicación en tranques de relaves es baja.

En la Tabla 26 se presentan los métodos no invasivos.

**Tabla 26: Estado del arte de la instrumentación geotécnica no invasiva en depósitos de relaves (Modificado de AMTC, 2018)**

Método de medición	Parámetro que mide	Formato de medición	Frecuencia usual de medición	Madurez tecnología
<b>InSAR</b>	Los desplazamientos	Continuo y en línea	10 minutos	Media a alta, debido al aumento del uso de radares como instrumentación.
<b>Fotogrametría</b>	Los desplazamientos	La medición es discreta, ya que considera el uso de imágenes. Pueden ser obtenidas en línea	No se tiene información con relación a la frecuencia de medición	Alto. Sin embargo, en depósitos de relaves se está iniciando su implementación.

### 4.3 Catastro de instrumentación en depósitos de relaves chilenos

El Consejo Minero (CM) es la asociación gremial que reúne a las empresas mineras de mayor tamaño que producen en Chile. Tiene como objetivos Impulsar el desarrollo competitivo y sustentable del sector minero y su entorno, dar a conocer la realidad del sector minero, sus desafíos y su aporte al desarrollo de los chilenos, entre otros. Como parte del segundo objetivo, en su página web es posible encontrar información sobre los depósitos de las empresas socias.

A continuación, se presentan las principales características, la instrumentación geotécnica declarada y los parámetros físicos a controlar de cada uno de los depósitos de las empresas socias. Además, se incluye información complementaria declaradas por las empresas a través del Formulario E-700 (informe trimestral en el cual se especifica el estado del depósito hasta la fecha) correspondiente al primer trimestre del 2022 (esta información se solicitó a SERNAGEOMIN a través del Portal Transparencia)

Todos los depósitos presentados en esta sección están actualmente activos, excepto por Barahona 1 y 2 los cuales se encuentran inactivos. Cabe mencionar que según la página web la información fue actualizada en marzo del 2021 o marzo del 2022 dependiendo de la empresa.

#### 4.3.1 Depósito de Arenas, Caserones

Es un acopio de arenas perteneciente a la Minera Lumina Copper Chile (MLCC). Se ubica en la comuna de Tierra Amarilla, región de Atacama. Es conocido como el Tambo y tiene aproximadamente 3 kilómetros de longitud. En este acopio se deposita la fracción gruesa del relave en terrazas compactadas. Su muro de partida es muy pequeño con porcentaje de finos de alrededor de 20%. No posee laguna de aguas claras.

#### Características del depósito

En la Tabla 27 se presentan las principales características del depósito de relaves.

**Tabla 27: Principales características del Depósito de Arenas, Quebrada Caserones.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Empréstito	Método de Aguas Abajo	Acopio de Arenas	Actual 13 m; Proyectada 49 m.	10 m	N/A	N/A

## Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 28: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de Arenas.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 16* piezómetros cuerda vibrante (en línea)</li> <li>• 6* piezómetros de Casagrande</li> <li>• Prismas</li> <li>• Radar</li> <li>• InSAR*</li> <li>• 2* acelerómetros</li> <li>• 1* aforador de caudal (diario)</li> <li>• pozos de monitoreo (mensual)</li> <li>• Análisis fisicoquímico, muestreo y análisis de aguas mensuales y trimestrales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Granulometría (% de finos)</li> <li>• Porcentaje de sólidos en descarga</li> <li>• Nivel de compactación de las arenas</li> <li>• Permeabilidad.</li> <li>• Taludes de depositación y construcción.</li> </ul>

En \* se indica la información obtenida a través del Formulario E-700

### **4.3.2 Depósito de Relaves Espesados Minera Centinela**

Es un depósito de relaves de la empresa Antofagasta Minerals. Se ubica en la Comuna de Sierra Gorda, provincia y región de Antofagasta.

### Características del depósito

En la Tabla 29 se presentan las principales características del depósito de relaves. El depósito consta de tres muros (Muro principal, Muro Secundario Sur y Muro Oeste).

**Tabla 29: Principales características del Depósito de relaves Espesados Minera Centinela.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
S/I	Método de aguas abajo (muro principal y secundario)	Relaves espesados	Muro Principal 40 m; Muro Secundario Sur 25 m; Muro Oeste 25 m.	Muro Principal 40 m; Muro Secundario Sur 25 m; Muro oeste 25 m.	2 m	Menor a 50.000 m <sup>3</sup>

## Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 30: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de relaves Espesados Minera Centinela.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Piezómetros de cuerda vibrante</li> <li>• Piezómetros de fibra óptica</li> <li>• Piezómetros de Casagrande</li> <li>• Con frecuencia de medición semanal*</li> <li>• Acelerómetros.</li> <li>• Inclínómetros.</li> <li>• ShapeArrays*</li> <li>• Hitos Topográficos.</li> <li>• Control de infiltraciones mediante 5 pozos de monitoreo con frecuencia de medición semanal*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distribución de tamaño: tamaño máximo andesita 1000mm.</li> <li>• Variables geotécnicas de relaves.</li> <li>• Reología de relaves.</li> <li>• Topografía del área del depósito para el control de capacidad y control de pendientes de playa.</li> <li>• Revancha operacional e hidráulica (cada 2 semanas*)</li> <li>• Angulo de taludes.</li> <li>• Ancho coronamiento.</li> <li>• Volumen de agua interior depósito.</li> </ul>

En \* se indica la información obtenida a través del Formulario E-700

### 4.3.3 Depósito de Relaves El Trigo

Este depósito perteneciente a la Compañía Minera del Pacífico (CMP) se ubica en la comuna La Serena, región de Coquimbo.

### Características del depósito

**Tabla 31: Principales características del Depósito de relaves El Trigo.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Constituido por material de rechazo menor a 2"	Método de Aguas Abajo	Relave Convencional	37,2 m	10 m	5 m	Variable según estación

## Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 32: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de relaves El Trigo.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"><li>• 4 piezómetros acústicos</li><li>• 2 pozos de monitoreo</li><li>• Topografía (informes mensuales)</li><li>• Flujómetros y densímetros en las líneas de impulsión de relaves</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Distribución de tamaño: 80% &lt;100um; top size 600 um</li><li>• Porcentaje de sólidos de 55% depositado</li><li>• Revancha</li><li>• Distancia de laguna de aguas claras respecto al muro</li></ul>

### 4.3.4 Depósito de Relaves Los Corralillos

El depósito se ubica en la comuna de Copiapó, Región de Atacama. Pertenece a la empresa CMP.

## Características del depósito

**Tabla 33: Principales características del Depósito de relaves Los corralillos.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha a mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Muro construido con material granular estéril	Método de eje central	Relaves espesados	Actual 43 m; proyectada 73 m	30,3 m	4 m	S/I

## Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 34: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de relaves Los Corralillos.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"><li>• 13 piezómetros (distribuidos entre el muro y los relaves) *</li><li>• 12 pozos de monitoreo (distribuidos en la cortina superior y aguas abajo del muro) *</li><li>• Topografía</li><li>• Monitoreo mensual</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Revancha</li><li>• Ángulo de talud aguas abajo</li><li>• Ancho del coronamiento</li><li>• Nivel de laguna y distancia al muro</li></ul>

En \* se indica la información obtenida a través del Formulario E-700

### 4.3.5 Depósito de Relaves Los Diques

Es un depósito de la empresa Candelaria. Se ubica en la comuna Tierra Amarilla, región de Atacama.

#### Características del depósito

Este depósito está compuesto por tres muros de contención. La Tabla 35 se presenta las principales características:

**Tabla 35: Principales características del Depósito de relaves Los Diques.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura proyectada	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Muro enrocado	Método Aguas Abajo	Relaves convencionales	Muro Principal 156 m; Muro Norte 87 m; Muro Sur 112 m	30 m	5 m	300.000 m <sup>3</sup>

#### Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 36: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de relaves Los Diques.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"><li>• Piezómetros.</li><li>• Acelerómetros.</li><li>• Inclinómetros*</li><li>• Hitos de referencia.</li><li>• Pozos de control.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Parámetros de diseño.</li></ul>

En \* se indica la información obtenida a través del Formulario E-700

### 4.3.6 Depósito de Relaves Pampa Pabellón

Este depósito perteneciente a la empresa Doña Inés de Collahuasi se ubica en la comuna Pica, región de Tarapacá.

## Características del depósito

En la Tabla 37 se presentan las principales características del depósito de relaves.

**Tabla 37: Principales características del Depósito de relaves Pampa Pabellón.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Construido con material estéril de la mina	Método de Aguas Abajo	Relaves convencionales	75 m	40 m	3 m	1.992.180 m <sup>3</sup>

## Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 38: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de relaves Pampa Pabellón.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"><li>• 15 piezómetros (diario) (se registra niveles freáticos y columna de agua)</li><li>• 2 acelerómetros.</li><li>• Radar.</li><li>• Monitoreo satelital.</li><li>• La instrumentación en el muro está registrándose continuamente, a través del sistema DARES MAPPER.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Para la construcción del muro se controla la mecánica de suelos de los materiales que conforman el muro. Macrogranulometrías, granulometrías, macrodensidades, densidades, compactación, humedad.</li><li>• Revancha: Se controlan una (1) vez por semana, de tal manera de verificar que se encuentre bajo los requerimientos de diseño (3m min).</li><li>• Ángulo de talud aguas abajo: 1(V):1,80 (H)</li><li>• Ancho del coronamiento: 40 m.</li><li>• Nivel de laguna y distancia al muro</li><li>• Existe un Plan de Respuestas ante Emergencias, ya mencionado en punto anterior, con actualización anual.</li></ul>

### **4.3.7 Depósito de Relaves Sierra Gorda**

El Depósito de Relaves se ubica en la comuna de Sierra Gorda, Región de Antofagasta. Pertenece a la empresa KGHM.

## Características del depósito

Las principales características del depósito son:

**Tabla 39: Principales características del Depósito de relaves Sierra Gorda.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Muro de empréstito	Método de Aguas Abajo	Relave espesado	37,2 m	41 m *	En sectores con laguna 2 m; En sectores sin laguna 1 m	40.000 m <sup>3</sup>

En \* se indica la información obtenida a través del Formulario E-700

## Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 40: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de relaves Sierra Gorda.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"><li>• Acelerómetros: 4 (1 ubicado en el suelo de fundación, 1 en roca y 2 ubicados en distintos muros) *.</li><li>• Inclinómetros: 3</li><li>• Extensómetros</li><li>• Piezómetros fibra óptica: 44</li><li>• Piezómetro de cuerda vibrante: 17</li><li>• Piezómetros Casa Grande: 15</li><li>• Batimetría (frecuencia de monitoreo mensual)</li><li>• Topografías</li><li>• Sistema de control de infiltraciones a través de pozos de monitoreo*</li><li>• Inspección física diaria, semanal y mensual, realizada por distintas personas y competencias para la detección de anomalías.</li><li>• Toda la instrumentación se encuentra con conectividad on-line, por lo tanto, con monitoreo y reportabilidad continua.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Distribución granulométrica y porcentaje de sólidos</li><li>• Revancha</li><li>• Ángulo de talud aguas abajo</li><li>• Ancho del coronamiento</li><li>• Nivel de laguna</li><li>• Volumen de agua acumulada</li></ul>

En \* se indica la información obtenida a través del Formulario E-700

### **4.3.8 Depósito de Relaves Zaldívar**

Es un depósito de relaves de la empresa Antofagasta Minerals. Se ubica en la comuna de Antofagasta, segunda región.

## Características del depósito

**Tabla 41: Principales características del Depósito de relaves Zaldívar.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Muro de ripios lixiviados	Método de Aguas Abajo	Relave convencional	Actual 39 m; Proyectada 45 m	10 m	1 m	Máximo 20.000 m <sup>3</sup>

## Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 42: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Depósito de relaves Zaldívar.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"><li>• 14 piezómetros*</li><li>• Prismas</li><li>• Acelerógrafos</li><li>• Frecuencia de monitoreo mensual</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Deformación o desplazamientos a nivel de superficies.</li><li>• Agrietamientos o evolución de éstas sobre la infraestructura del muro.</li><li>• Aumento de los niveles freáticos al interior de muro.</li><li>• Niveles históricos de sismicidad.</li></ul>

En \* se indica la información obtenida a través del Formulario E-700

### **4.3.9 Embalse Carén**

Este depósito perteneciente a la empresa Codelco se ubica en la comuna de Alhué, Región metropolitana.

## Características del depósito

En la Tabla 43 se presentan las principales características del embalse.

**Tabla 43: Principales características del Embalse Carén.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Empréstito	Método de Aguas Abajo	Embalse	97 m	S/I	5 m	17,4 mm <sup>3</sup>

## Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 44: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Embalse Carén.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acelerómetros</li> <li>• Piezómetros tipo cuerda vibrante</li> <li>• Piezómetros Casagrande</li> <li>• Inclínómetros</li> <li>• Asentímetros.</li> <li>• En proceso de implementación instrumentación adicional 7ma etapa.</li> <li>• Programa de monitoreo y Frecuencia de informes (diario, semanal, mensual, trimestral).</li> <li>• Monitoreo en línea de piezómetros cuerda vibrante, medición de piezometría Casagrande, inclinómetros y asentímetros (diario).</li> <li>• Servicio Monitoreo Interferometría Satelital InSAR (reporte mensual).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentración en peso (Cp).</li> <li>• Revancha relaves sobre bloqueo torre.</li> <li>• Pendiente de la Playa: perfiles batimétricos (c/10 días).</li> <li>• Topobatimetría (comportamiento llenado c/3 meses).</li> <li>• Control diario de Revanchas Torre.</li> <li>• Largo laguna.</li> </ul>

### 4.3.10 Embalse de Lamas, Caserones

Este depósito perteneciente a la Minera Lumina Copper Chile (MLCC) se ubica en la comuna de Tierra Amarilla, región de Atacama. Es conocido como La breca.

### Características del depósito

En la Tabla 45 se presentan las principales características del depósito.

**Tabla 45: Principales características del Embalse de Lamas.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Empréstito	Método de Aguas Abajo	Embalse de lamas espesadas	Actual 148 m; Proyectada 248 m	40 m	Operacional 5 m	442.148 m <sup>3</sup>

## Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 46: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Embalse de Lamas.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 26* piezómetros de Cuerda Vibrante (en línea)</li> <li>• 3* acelerómetros</li> <li>• 2* aforadores de caudal (diario)</li> <li>• 13 prismas*</li> <li>• Radar</li> <li>• InSAR*</li> <li>• Pozos de monitoreo (mensual)</li> <li>• Análisis fisicoquímico, muestreo y análisis de aguas mensuales y trimestrales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Granulometría.</li> <li>• Porcentaje de sólidos en descarga.</li> <li>• Distribución de las descargas.</li> <li>• Revancha.</li> <li>• Volumen laguna.</li> <li>• Compactación en Muro.</li> <li>• Taludes del muro</li> </ul>

En \* se indica la información obtenida a través del Formulario E-700

### **4.3.11 Embalse de Relaves Altonorte**

Es un Embalse de Relaves de la empresa Glencore. Se ubica en la Ciudad de Antofagasta, II región.

### Características del depósito

En la Tabla 47 se presentan las principales características del embalse. Cabe mencionar que este embalse no cuenta con una laguna de aguas claras.

**Tabla 47: Principales características del Embalse de relaves Altonorte.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Material empréstito	Aguas Abajo	Relaves en pasta	31 m	6 m	3 m	N/A

## Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 48: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Embalse de relaves Altonorte.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programa de monitoreo, inspección visual diaria, a todo el sistema.</li> <li>• Monitoreo semanal a los Piezómetros y Zanjias de inspección aguas abajo del muro.</li> <li>• Monitoreo trimestral de Prismas topográficos en muro y depósito.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volumen de relave depositado</li> <li>• Granulometría y porcentaje de sólidos</li> <li>• Revancha</li> <li>• Desplazamiento vertical/horizontal del muro</li> <li>• Medidas de emergencia y conocimiento del Plan</li> <li>• Presencia Ausencia Agua en muro.</li> <li>• Niveles freáticos</li> <li>• Volumen de agua infiltrada recuperada.</li> </ul>

### 4.3.12 Embalse de Relaves Carmen de Andacollo

Este depósito, perteneciente a la empresa Minera Teck se ubica en la comuna de Andacollo, región de Coquimbo.

#### Características del depósito

El proyecto del Embalse de Relaves Carmen de Andacollo consta de 5 muros, sin embargo, aún no se comienza la construcción del quinto muro. En la Tabla 49 se presentan las principales características del embalse.

**Tabla 49: Principales características del Embalse de relaves Carmen de Andacollo.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Todos los muros son construidos con material de empréstito	Todos los muros son construidos con el método de Aguas Abajo	Relaves espesados	MN 44,5 m; MNO <b>109,5 m</b> ; MO 62,5 m; MS7,5 m; MP 0 m	50 metros para etapas iniciales, 30 m para etapa final	Operacional 3 m; Hidráulica 1 m	Entre 200.000 m <sup>3</sup> a 700.000 m <sup>3</sup>

## Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 50: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Embalse de relaves Carmen de Andacollo.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 18 piezómetros de cuerda vibrante (semanal).</li> <li>• 6 piezómetros de fibra óptica (semanal).</li> <li>• 6 piezómetros Casagrande (en tiempo real).</li> <li>• 2 acelerógrafos (trimestral).</li> <li>• 45 monolitos para control de asentamientos (trimestral).</li> <li>• 1 estación total robotizada (en tiempo real).</li> <li>• 27 prismas distribuidos (en tiempo real).</li> <li>• 5 aforadores, con vertedero tipo V, para control de drenajes, filtraciones y afloramientos (diario).</li> <li>• Batimetría y levantamiento topográfico de playas (mensual).</li> <li>• InSAR (mensual)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niveles piezométricos.</li> <li>• Revancha.</li> <li>• Asentamientos.</li> <li>• Elevación Laguna de Aguas Claras y Playa de Relaves.</li> <li>• Longitud de Playas.</li> <li>• Caudales para Descarga de Relaves, Agua Recuperada, Drenajes, Filtraciones y Afloramientos.</li> <li>• Granulometría de los Relaves.</li> <li>• Concentración en Peso.</li> <li>• Presión en cañerías.</li> <li>• Espesor de Cañerías.</li> <li>• Volumen de Laguna.</li> <li>• Compactación de Rellenos</li> <li>• Geometría de los rellenos (topografía).</li> </ul>

### 4.3.13 Embalse de Relaves Salar de Talabre

Pertenece a la empresa Codelco. Se ubica en la comuna de Calama, región de Antofagasta. Cuenta cinco muros (Muro Norte, Muro Oeste, Muro Sur, Muro Noroeste I y Muro Noroeste II).

#### Características del depósito

En la Tabla 51 se presentan las principales características del embalse.

**Tabla 51: Principales características del Embalse de relaves Salar de Talabre.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Mixto (arena y empréstito)	Método de Aguas Abajo	Relave Convencional	Muro Norte 39 m; Muro Oeste 55 m; Muro Sur 40 m; Muro Noroeste I 31 m; Muro Noroeste II 31	12 m	Operacional 1 m	1.100.000 m <sup>3</sup>

## Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 52: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Embalse de relaves Salar de Talabre.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Piezómetro eléctrico / mensual</li> <li>• Acelerógrafo / mensual</li> <li>• Interferometría satelital / semestral</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nivel freático</li> <li>• Aceleración sísmica</li> <li>• Deformación / asentamiento</li> </ul>

### 4.3.14 Tranques de Relaves Barahona 1 y 2

Estos depósitos se ubican en la comuna de Machalí, región de O'Higgins. Pertenecen a la empresa Codelco.

## Características del depósito

**Tabla 53: Principales características de los Tranques de relaves Barahona 1 y 2.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Muro 1: Arenas; Muro 2: Arenas; Muro 3: Empréstito	Muro 1 con método de construcción Aguas Arriba; Muro 2 con método de construcción Aguas Abajo con últimos 7 metros contruidos Aguas Arriba	Tranque de relaves	Muro 1: 54 m; Muro 2: 63 m; Muro 3: 22 m	Muro 1: 1.450 m; Muro 2: 1700 m; Muro 3: 500 m	1 m	N/A

## Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 54: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar de los Tranques de relaves Barahona 1 y 2.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barahona No.1: 19 piezómetros Casagrande y 2 acelerógrafos operativos. Frecuencia de registro mensual.</li> <li>• Barahona No 2: 34 piezómetros Casagrande, 4 acelerógrafos, 8 piezómetros de cuerda vibrante, operativos. Frecuencia de registro mensual.</li> <li>• Servicio de monitoreo interferometría satelital InSAR (mensual).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mediciones de flujo filtraciones muro.</li> </ul>

#### 4.3.15 Tranque de Relaves El Mauro

Es un depósito de relaves de la empresa Antofagasta Minerals. Se ubica en la comuna de Los Vilos, provincia del Choapa, región de Coquimbo.

#### Características del depósito

**Tabla 55: Principales características del Tranque de relaves El Mauro.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Muro de arenas cicloneadas	Método de aguas abajo	Relaves convencionales	175,4 m	10 m	Operacional 5 m; Hidráulica 1,5 m	0,7 Mm <sup>3</sup>

#### Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 56: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Tranque de relaves El Mauro.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"><li>• 14 piezómetros de fibra óptica*</li><li>• 7 piezómetros dobles*</li><li>• 4 piezómetros dinámicos*</li><li>• 15 piezómetros de Cuerda Vibrante*</li><li>• 31 piezómetros Casagrande*</li><li>• Se dispone de piezómetros en el sistema de drenes*</li><li>• Aforadores de caudal*</li><li>• 3* acelerómetros.</li><li>• Prismas.</li><li>• El monitoreo se realiza mensualmente.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Granulometría de arenas.</li><li>• Grado de compactación de arenas.</li><li>• Revancha (operacional, hidráulica y seguridad).</li><li>• Angulo de talud aguas abajo.</li><li>• Ancho del coronamiento.</li><li>• Nivel de laguna y distancia al muro.</li><li>• Batimetrías</li></ul>

En \* se indica la información obtenida a través del Formulario E-700

#### 4.3.16 Tranque de Relaves El Torito

Es un tranque de relaves de la empresa Anglo American. Se ubica en la Provincia de Quillota, Comuna de Nogales, Región de Valparaíso.

## Características del depósito

En la Tabla 57 se presentan las principales características del Tranque. Cabe mencionar que no se tiene información del largo del muro.

**Tabla 57: Principales características del Tranque de relaves el Torito.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Arena cicloneada	Eje central	Relaves convencionales	Actual 94,5 m; proyectada a 107 m	13 m	3 m	305.940 m <sup>3</sup>

## Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 58: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Tranque de relaves El Torito.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"><li>• 45* piezómetros cuerda vibrante (lectura cada 1 hora)</li><li>• 25* piezómetros Casagrande (automatizados y con lectura cada 1 hora)</li><li>• Instalados en el sistema de drenaje y fundación del muro de arenas y muros auxiliares.</li><li>• 1 inclinómetro</li><li>• 2* Clinoextensómetros</li><li>• 3 acelerómetros (ubicados en el coronamiento, suelo de fundación y roca)</li><li>• Control Topográfico</li><li>• Telemetría y Telecontrol: Constituido por una estación maestra y cinco estaciones remotas que permite monitorear y comandar todas las variables y equipos asociados al tranque, relaves (lamas y arenas), agua recirculada e instalaciones de agua fresca, de modo de mantener un control adecuado de la operación.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Arena cicloneada (con &lt; 20% pasando malla #200)</li><li>• Ancho de coronamiento mínimo: 13 m</li><li>• Revancha mínima: 3 m durante (4 m para abandono)</li><li>• Talud Aguas Abajo: 3,7H:1V</li><li>• Talud Aguas Arriba: 2,0:1V</li><li>• Compactación mínima: 95% densidad según Proctor Estándar.</li></ul>

En \* se indica la información obtenida a través del Formulario E-700

### **4.3.17 Tranque de Relaves Las Tórtolas**

Es un depósito de relaves de la empresa Anglo American. Se ubica en la Comuna de Colina, Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana.

## Características del depósito

Este depósito consta de tres muros (Muro Principal, Muro Oeste y Muro Este). En la Tabla 59 se presentan las principales características del embalse.

**Tabla 59: Principales características del Tranque de relaves Las Tórtolas.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha a mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Muro de partida de empréstito . Arena cicloneada	Aguas Abajo	Relaves convencionales	Muro Principal 105 m; Muro Oeste 31,8 m; Muro Este 6, 3 m.	15 m	3 m	280.000 m <sup>3</sup> *

En \* se indica la información obtenida a través del Formulario E-700

## Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 60: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Tranque de relaves Las Tórtolas.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<p><b>MURO PRINCIPAL</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 piezómetros fibra óptica dinámicos*</li> <li>• 6 piezómetros de fibra óptica estáticos*</li> <li>• 20 piezómetros de cuerda vibrante*</li> <li>• 12 piezómetros de Casagrande*</li> <li>• 2 Asentímetros*</li> <li>• 3 acelerómetros (ubicados en el coronamiento, el suelo de fundación y en roca).</li> <li>• Monitoreo del sistema de drenaje a través de piezómetros*</li> <li>• Topografía (levantamiento fotogramétrico mediante Dron) *</li> <li>• Batimetría*</li> <li>• Levantamiento LiDAR Aerotransportado*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nivel Freático</li> <li>• Deformación</li> <li>• Aceleraciones</li> <li>• Distancia a la laguna de aguas claras*</li> <li>• Revancha operacional*</li> </ul>

En \* se indica la información obtenida a través del Formulario E-700

### 4.3.18 Tranque de Relaves Los Quillayes

Es un depósito de relaves de la empresa Antofagasta Minerals. Se ubica en la comuna de Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo. Actualmente opera solo como respaldo del Tranque de relaves El Mauro.

#### Características del depósito

En la Tabla 61 se presentan las principales características del tranque.

**Tabla 61: Principales características del Tranque de relaves Los Quillayes.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Muro de arenas cicloneadas	Método de Aguas Abajo	Relave convencional	198 m	20 m	Operacional 110 m*	S/I

En \* se indica la información obtenida a través del Formulario E-700

#### Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 62: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Tranque de relaves Los Quillayes.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"><li>• 55* piezómetros de Cuerda Vibrante.</li><li>• 17* piezómetros de Casagrande.</li><li>• 2 acelerógrafos (se ubican en el suelo de fundación y en el coronamiento) *</li><li>• Celdas de asentamientos</li><li>• Topografía</li><li>• El control de toda la instrumentación se realiza mensual.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• No Aplica (no hay levantamiento de muro desde 2008).</li></ul>

En \* se indica la información obtenida a través del Formulario E-700

### 4.3.19 Tranque de Relaves Laguna Seca

Es un tranque de relaves de la empresa BHP. Se ubica en la comuna y región de Antofagasta.

#### Características del depósito

**Tabla 63: Principales características del Tranque de relaves Laguna Seca.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Empréstito	Método de Aguas Abajo	Relave convencional	Actual 52 m; Proyectada 107 m	15 m	5 m	Máximo 2.500.000 m <sup>3</sup>

#### Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 64: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Tranque de relaves Laguna Seca.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"><li>• Piezómetros</li><li>• Inclínómetros</li><li>• Clinoextensómetros</li><li>• Acelerómetros</li><li>• Interferometría satelital</li><li>• Radares</li><li>• Estación total</li><li>• 12 pozos de observación aguas arriba del muro, 4 pozos aguas abajo del muro y 9 pozos de la cortina*</li><li>• Aforadores de caudal*</li><li>• Monitoreo en línea y reportes mensuales</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• QA/QC del proceso de construcción de la infraestructura (año 2020).</li><li>• Instrumentación Geotécnica del muro.</li><li>• Revancha (Mayor a 5m)</li><li>• Distancia Laguna-muro (Mayor a 500 m)</li><li>• Caudal drenes basales</li><li>• Operación de los pozos de la cortina del muro, para mantener control del afloramiento</li></ul>

En \* se indica la información obtenida a través del Formulario E-700

#### 4.3.20 Tranque de Relaves Ovejería

Es un depósito de relaves de la empresa Codelco. Se ubica en la comuna Til Til, región metropolitana. Cuenta con un Muro Principal y un Muro Este.

#### Características del depósito

En la Tabla 65 se presentan las principales características del tranque.

**Tabla 65: Principales características del Tranque de relaves Ovejería.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Muro de arenas cicloneadas	Método de Aguas Abajo	Relave convencional	Actual 64,3 m; Proyectada 130 m	15 m	Hidráulica 5 m	3.037.858 m <sup>3</sup>

#### Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 66: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Tranque de relaves Ovejería.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"><li>• Piezómetros tipo cuerda vibrante y piezómetros Casagrande, además de acelerómetros. En proceso de implementación piezómetros electrodinámicos y celdas de asentamiento.</li><li>• Programa de monitoreo y Frecuencia de informes (diario, semanal, mensual, trimestral, semestral).</li><li>• Monitoreo en línea de piezómetros cuerda vibrante, seguimiento de piezometría Casagrande quincenal.</li><li>• Información e instrumentación mínima requerida en línea con instrumentación actual, en proceso instalación de instrumentación complementaria.</li><li>• Servicio de monitoreo interferometría satelital InSAR (mensual).</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se cuenta con el canal de contorno que conduce las aguas capturadas de la laguna de aguas claras.</li><li>• Distribución de tamaño: Granulometría y porcentaje de finos: Control de compactaciones mínimo de 95% del proctor estándar, granulometría: máximo de finos 15% sobre el muro de arenas.</li><li>• Revancha: 5 m respecto a la laguna.</li><li>• Ángulo de talud aguas abajo: 13,01°.</li><li>• Ancho del coronamiento: 15 m</li><li>• Nivel de laguna y distancia al muro: 635,5 msnm; 603 m</li><li>• Medidas de emergencia y conocimiento del Plan: Manual de Emergencias Tranque de Relaves Ovejería SIGO-P-RE-020 2019.</li></ul>

### 4.3.21 Tranque de Relaves Pampa Austral

Este depósito perteneciente a la empresa Codelco se ubica en la comuna Diego de Almagro, región de Atacama.

#### Características del depósito

En la Tabla 67 se presentan las principales características del depósito de relaves. Este depósito consta de 8 muros.

**Tabla 67: Principales características del Tranque de relaves Pampa Austral.**

Tipo de muro	Método de Construcción	Tipo de depósito	Altura	Coronamiento	Revancha mínima	Volumen de laguna de aguas claras
Empréstito	Método de Aguas Abajo	Relave Convencional	Muro Principal 36 m; Muro Norte I 11 m; Muro Norte II 14 m; Muro Sur I 7,5 m; Muro Sur II 7 m; Muro Sur III 3 m; Muro Sur IV 2 m; Muro Sur V 2 m	7 m	1,5 m	1,47 Mm <sup>3</sup>

#### Instrumentación y monitoreo geotécnico

**Tabla 68: Instrumentación, monitoreo y parámetros físicos a controlar del Tranque de relaves Pampa Austral.**

Instrumentación y monitoreo	Parámetros físicos para controlar
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 87 prismas en total, distribuidos: MN2 (24); MN1 (11); MPPAL (9); SUR1 (7); SUR2 (9); SUR3 (3) y 20 prismas están por definir su ubicación, prismas para monitoreo de deformaciones, monitoreo 3 veces por semana con reporte a Ingeniero de Registro.</li> <li>• 38 piezómetros Casagrande distribuidos en muros, monitoreo diario con reporte trimestral a Sernageomin y diario a Ingeniero de Registro</li> <li>• 77 placas de control topográfico para monitoreo trimestral con reporte a Sernageomin e Ingeniero de Registro.</li> <li>• Asentamientos/desplazamientos</li> <li>• 4 flujómetros para control de caudales evacuados y recirculados, monitoreo diario, con reporte trimestral a Sernageomin</li> <li>• 2 inclinómetros ShapeArray estribo izquierdo muro Norte-2</li> <li>• Servicio de monitoreo interferometría satelital InSAR (mensual)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Granulometría y porcentaje de sólidos.</li> <li>• Revancha de lagunas.</li> <li>• Volumen de lagunas a través de batimetrías.</li> <li>• Niveles piezométricos.</li> <li>• Desplazamiento y asentamiento muros de empréstito, para lo cual existen placas de control topográfico, prismas e interferometría.</li> </ul>

#### **4.4 Estado de la práctica de los sistemas de monitoreo geotécnico y perspectiva hacia el futuro**

Para conocer el estado de la práctica y la perspectiva hacia donde está yendo la instrumentación geotécnica en depósitos de relaves, se realizaron reuniones con Igor Bravo, CEO de Geosinergia, una de las empresas de instrumentación geotécnica más grande de Chile. A continuación, se presentan los temas discutidos.

Actualmente, está cambiando la forma de monitorear los depósitos de relaves. Mientras antes se trataba de cumplir con la normativa vigente del país, hoy en día se trata de evitar el colapso de los depósitos. Este cambio de pensamiento ha permitido desarrollar nuevas tecnologías para el monitoreo de los diversos modos de fallas a través de las variables geotécnicas.

Hoy en día, en los depósitos de relaves se está prefiriendo la instrumentación automatizada por sobre la manual, esto debido a (entre otros) la falta de personal especializado para la toma de datos y a la gran cantidad de tiempo que lleva medir ciertos instrumentos. Además, las grandes mineras están implementando (o han implementado) sistemas de monitoreo en línea en tiempo real. Estos sistemas buscan poder acceder a los datos de forma rápida para tomar medidas preventivas ante el desarrollo de un modo de falla. Cabe mencionar que en la mayoría de los depósitos estos datos se comparten a través de una red informática interna de la empresa, para prevenir la mala utilización de los datos recolectados.

En fallas de depósitos, se ha observado que estas no ocurren de forma espontánea, por el contrario, siempre hay indicadores que permiten predecir el colapso. Por esta razón, actualmente se busca implementar sistemas de alerta temprana. Para esto, los instrumentos deben tener sensores dinámicos, ya que permiten registrar datos cuando ocurre un evento sísmico, para lo cual la respuesta debe ser instantánea, como también instrumentos no dinámicos, pero que permiten conocer cuando comienza (tempranamente), una condición que pudiera transformarse en una emergencia no esperada futura.

En relación con el mantenimiento de los sistemas de instrumentación, estos normalmente son realizados correctamente. Sin embargo, en muchos casos el problema está en la data del instrumento (las mediciones del instrumento que se está viendo en el sistema no es la que corresponde). Esto conlleva a análisis de datos que no son acorde con lo que ocurre en terreno. De ahí, que las mantenciones preventivas deben considerar tanto las clásicas mantenciones del sistema, como también el conocer e identificar que el estado de los sensores sea adecuado y congruente con lo que se observa en terreno.

En la sección anterior (0) se pudo observar que las celdas de asentamientos y las celdas de presión ya no se utilizan mayormente en los depósitos de relaves. Esto se debe principalmente a que con el tiempo estos instrumentos han dejado de funcionar tempranamente, ya que a medida que el muro se deforma (debido a la carga generada por el aumento en el tamaño del muro) el sistema de ambos instrumentos se comienza a tensar cada vez más hasta que se produce el fallo. En el caso de las

celdas de asentamientos, estas han sido reemplazadas por instrumentos como inclinómetros o clinoextensómetros.

Con respecto a las presiones de poros, actualmente se están monitoreando tanto de forma estática como dinámica. En relación con las filtraciones, hoy en día se busca implementar los sensores de humedad y la resistividad eléctrica en línea. Con relación al primero, este aún no había sido implementado, sin embargo, ha sido un anhelo largamente esperado por los diseñadores. Respecto al segundo, sólo se tomaba una lectura al año como forma rutinaria; sin embargo, ahora se está pasando a realizar tomas diarias de datos ERT (resistividad eléctrica), lo cual permite observar las variaciones tanto de humedad como observar posibles apariciones de inestabilidades internas tales como grietas u otras que pudieran inestabilizar los muros de relaves.

Con relación a los softwares utilizados para el monitoreo geotécnico de depósitos de relaves en Chile, actualmente existen 3 empresas que entregan el servicio, los cuales son en línea en tiempo real con alertas. Se espera que en un futuro estas empresas implementen metodologías que consideren el riesgo inminente de colapso, lo que obedece a protocolos de comunicación diferentes a los actuales, los cuales tienen una brecha de tiempo que no los hace en tiempo real puro, sino que a veces demora hasta 15 minutos en generar las alertas o en otros casos, toma el tiempo que la frecuencia de toma de datos considera (sample rate), ejemplo, cada 8 horas se puede ver el dato siguiente y como tal, el tiempo de alerta son entregados al final de cada nuevo dato recibido.

Finalmente, se menciona que Chile es un referente a nivel internacional, sin embargo, a pesar de que muchas de las empresas mineras están enfocadas en prevenir colapsos de los depósitos de relaves, aún hay depósitos que solo cumplen con lo mínimo solicitado.

Por otra parte, se realiza una reunión con Gonzalo Corral, CEO de Inteligencia geotécnica, consultora multi-nacional dedicada a proveer un software que permite monitorear de forma remota los depósitos de relaves, además de proporcionar la técnica InSAR, entre otros servicios. A continuación, se presentan los temas discutidos.

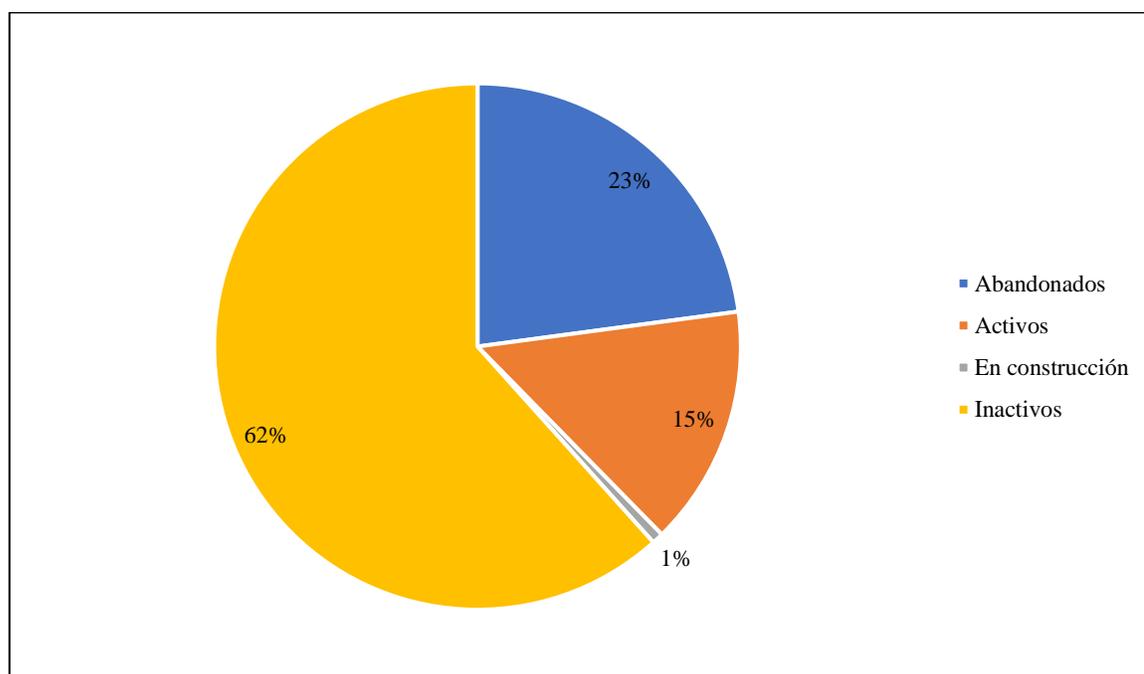
Actualmente los softwares son capaces de realizar diversos gráficos para el análisis de las variables geotécnicas mediante la configuración de diversos parámetros. Además, son capaces de mostrar áreas seleccionadas por el operador y relacionar los valores obtenidos por diversos instrumentos. También permiten definir umbrales y en caso de excederlos generar alertas a través de mensaje de texto, email y/o WhatsApp. Hoy en día, la integración de diversas variables geotécnicas es realizada por ingenieros.

Para el análisis de deformaciones, se destaca la importancia de ir comparando los resultados obtenidos con las etapas de construcción del muro, principalmente lo que respecta a las deformaciones generadas por la compactación del material. Por otra parte, se menciona que la velocidad y la aceleración de las deformaciones suelen ser más importantes que la magnitud de las deformaciones. Finalmente se indica que normalmente los informes asociados a la técnica InSAR tienen una frecuencia mensual.

## 5 Análisis Crítico de Sistemas de Instrumentación y Monitoreo en la Actualidad

En el Capítulo 4 se revisó el estado de la práctica en depósitos de relaves chilenos. El objetivo del presente capítulo es realizar un análisis crítico los sistemas de instrumentación y monitoreo en depósitos de relaves chilenos.

Según el Servicio Nacional de Geología y Minería (2022) en Chile existen 757 depósitos de relaves incluyendo depósitos en construcción, activos, inactivos y abandonados (actualizado el 10-08-2020). La distribución en porcentaje del estado se muestra en la Figura 35.



**Figura 35: Distribución del estado de Depósitos de relaves en Chile.**

Recolectar información de los sistemas de instrumentación y monitoreo de los depósitos no es fácil, debido a la existencia de acuerdos de confidencialidad entre las empresas mineras y sus trabajadores. Teniendo esto en cuenta, el presente análisis crítico se realiza con la información presentada en la sección 0, la cual consta de 20 depósitos activos y 2 inactivos. Pese a que la información a analizar corresponde solo al 3% de los depósitos de relaves en Chile, este 3% pertenece al 50% de los depósitos más grandes del país, y representa el 83% del volumen de relaves total autorizado en Chile (actualizado el 10-08-2020).

## 5.1 Variables geotécnicas

En esta sección se analizan las variables que influyen en los modos de fallas revisadas en la sección 2.5 del presente informe con el fin de comprender como se monitorean en la actualidad estas variables en depósitos chilenos. Cabe mencionar que se realizarán los análisis con la información recolectada, aunque se espera que exista información no declarada.

En la Tabla 69 se presenta a modo resumen la cantidad de depósitos que monitorea las variables geotécnicas mediante instrumentación invasiva y semi invasiva o no invasiva.

**Tabla 69: Cantidad de depósitos que abordan las variables geotécnicas con su porcentaje.**

Variable	Cantidad de depósitos que la abordan	Porcentaje
Nivel freático y presiones de poros	22	100%
Filtraciones	15	68%
Deformaciones	22	100%
Aceleraciones sísmicas	18	82%
Esfuerzos totales	0	0%
Condiciones climáticas	0	0%
Revancha	21/21	100%
Caudal	7	32%
Distancia a la laguna de aguas claras	14/17	82%
Volumen de agua en la laguna	15/18	83%

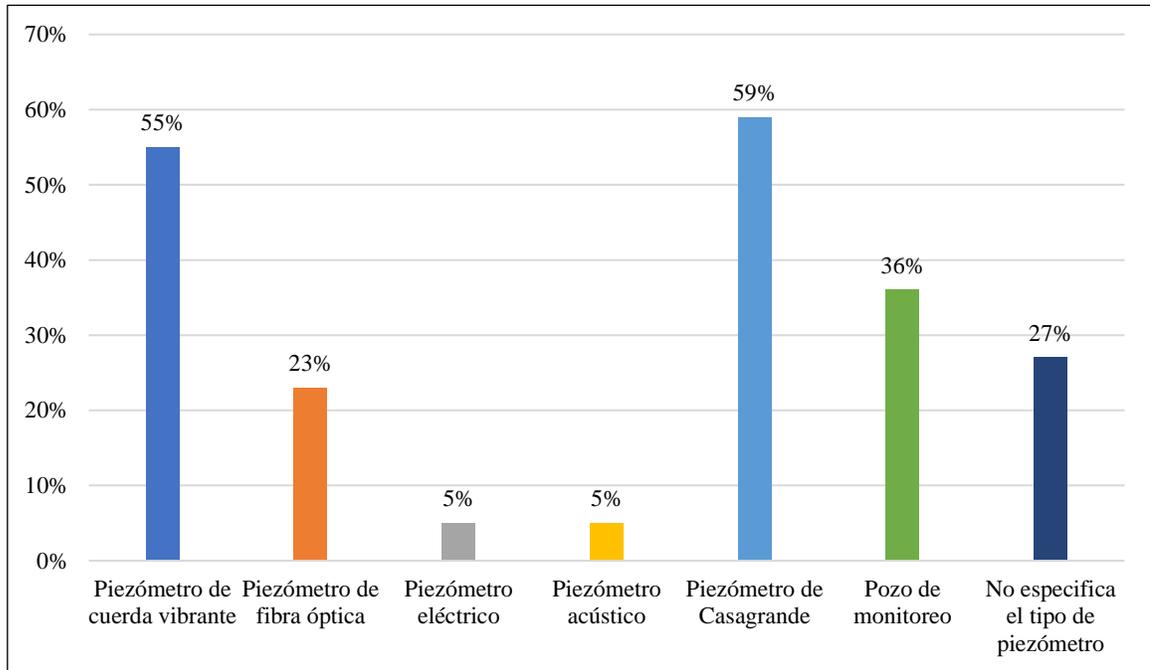
### 5.1.1 Nivel freático y presiones de poros.

En la tabla anterior se puede observar que el 100% de los depósitos de relaves revisados en la sección 0 monitorean el nivel freático y las presiones de poros. Esto mediante pozos de monitoreo y/o diferentes tipos de piezómetros.

En la Figura 36 se presenta el porcentaje de depósitos que tiene instalado las diversas formas de monitoreo. Se agregó una categoría que incluye el porcentaje de depósitos que no especifica el tipo de piezómetro instalado. Como se puede observar, la mayor parte de los depósitos tienen instalados piezómetros del tipo Cuerda Vibrante y/o Casagrande.

Además, un 36% de los depósitos declaró utilizar pozos de monitoreo. En este método de monitoreo las mediciones se realizan de forma manual, lo que normalmente significa una baja frecuencia de monitoreo frente a otras tecnologías, además, es posible que se cometa una mayor cantidad de errores debido a la alta dependencia del personal para su medición (disminuyendo la confianza en los datos obtenidos) y finalmente aumenta el riesgo del personal al tener que acudir a zonas que puedan ser peligrosas.

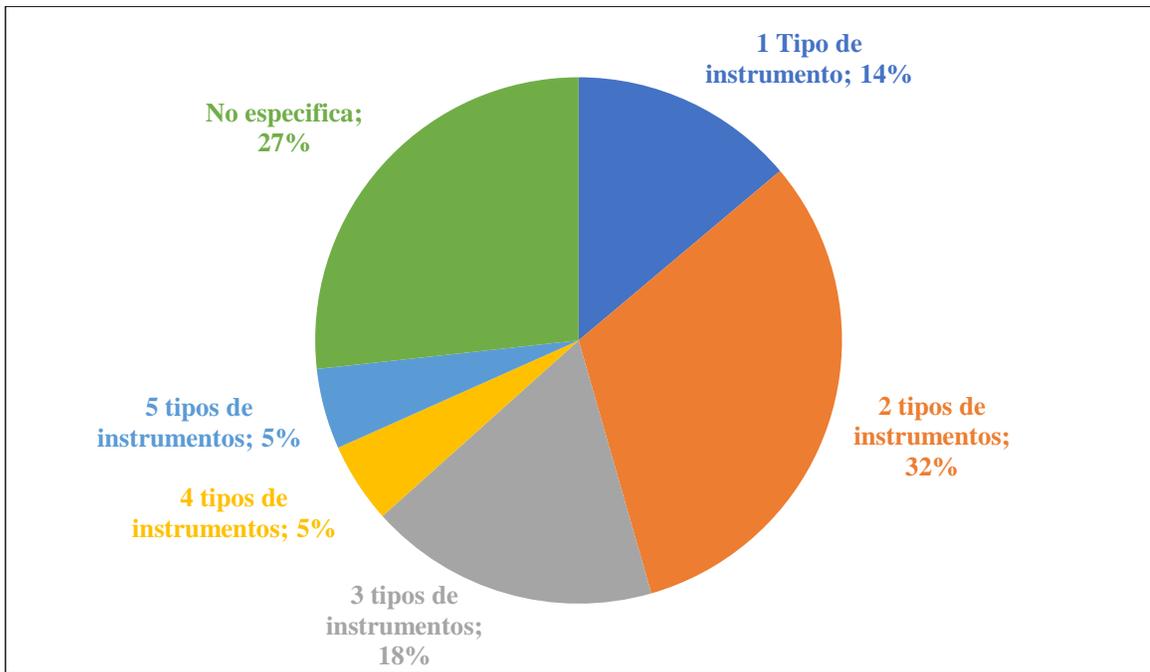
Finalmente, se puede observar que todos los métodos utilizados en los depósitos para el monitoreo de estas variables permiten monitorear puntos específicos del depósito y no áreas. Esto puede hacer que el análisis de los datos obtenidos sea más difícil de procesar y entender para los ingenieros a cargo.



**Figura 36: Porcentaje de depósitos que tienen instalados diversos métodos de monitoreos del nivel freático y/o las presiones de poros.**

Con el fin de mostrar cuantos diferentes tipos de instrumentación de monitoreo tienen los depósitos para estudiar el comportamiento de las variables de nivel freático y presiones de poros, se presenta en la Figura 37 los porcentajes de depósitos que monitorean el depósito a través de 1, 2, 3, 4 o 5 instrumentos. Además, se incluye el porcentaje de depósitos que no especifica cuantos diversos tipos de instrumentos presentan. Como se puede observar, solo un 14% declaró tener 1 tipo de instrumento (piezómetros o pozos de monitoreo), mientras que el 59% de los depósitos declaró tener entre 2, 3, 4 o 5 instrumentos.

La importancia de tener diversas tecnologías para el monitoreo de una misma variable radica en que diferentes métodos de instrumentación poseen diferentes vidas útiles y pueden fallar ante diferentes situaciones, por lo que una mayor variedad de instrumentación permitiría tener sistemas más resistentes.

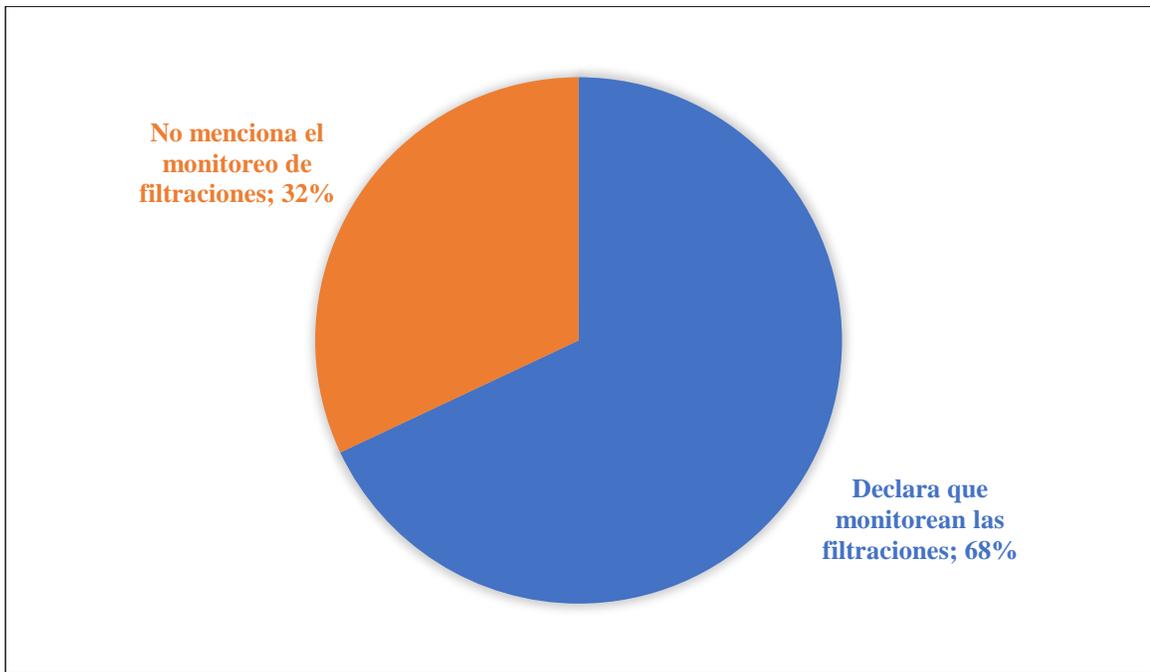


**Figura 37: Cantidad de tipos de instrumentación de monitoreo de nivel freático y/o presiones de poros.**

### 5.1.2 Filtraciones

Para monitorear las filtraciones en el muro y en el suelo de fundación, normalmente se utilizan los piezómetros y los aforadores de caudal. Los piezómetros normalmente se ubican bajo el muro (cerca del sistema de drenaje para verificar que este funcione adecuadamente) y aguas abajo del muro (para verificar el comportamiento de las filtraciones) mientras que los aforadores de caudal se suelen disponer en el sistema de drenaje (normalmente en el dren colector).

Con la información recolectada en la sección 0 no es posible concluir a ciencia cierta el porcentaje de los depósitos que monitorean las filtraciones, esto debido a que es necesario conocer la ubicación de los piezómetros, información que no todos los depósitos incluyeron. Sin embargo, en la Figura 38 se incluye todos los depósitos que declararon monitorear las filtraciones, tener piezómetros o pozos de monitoreo aguas abajo del muro o cerca al sistema de drenaje o tener instalados aforadores de caudal. Finalmente, se obtuvo que el 68% de los depósitos monitorea las filtraciones en o bajo el muro.

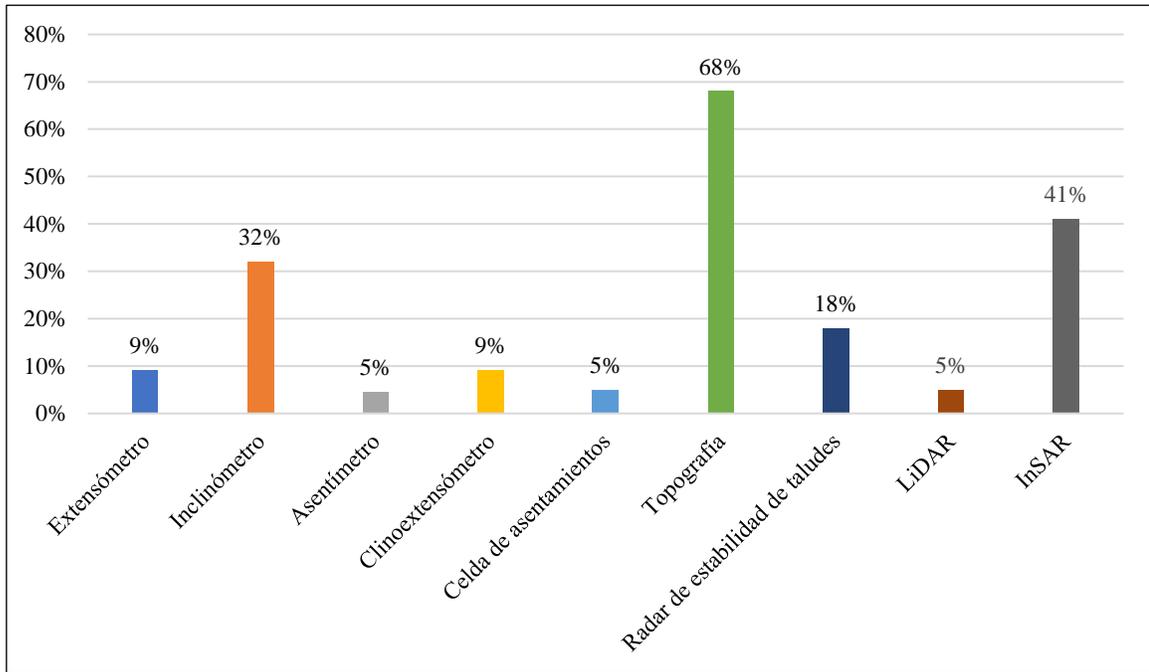


**Figura 38: Porcentaje de depósitos que declara monitorear las filtraciones.**

### 5.1.3 Deformaciones

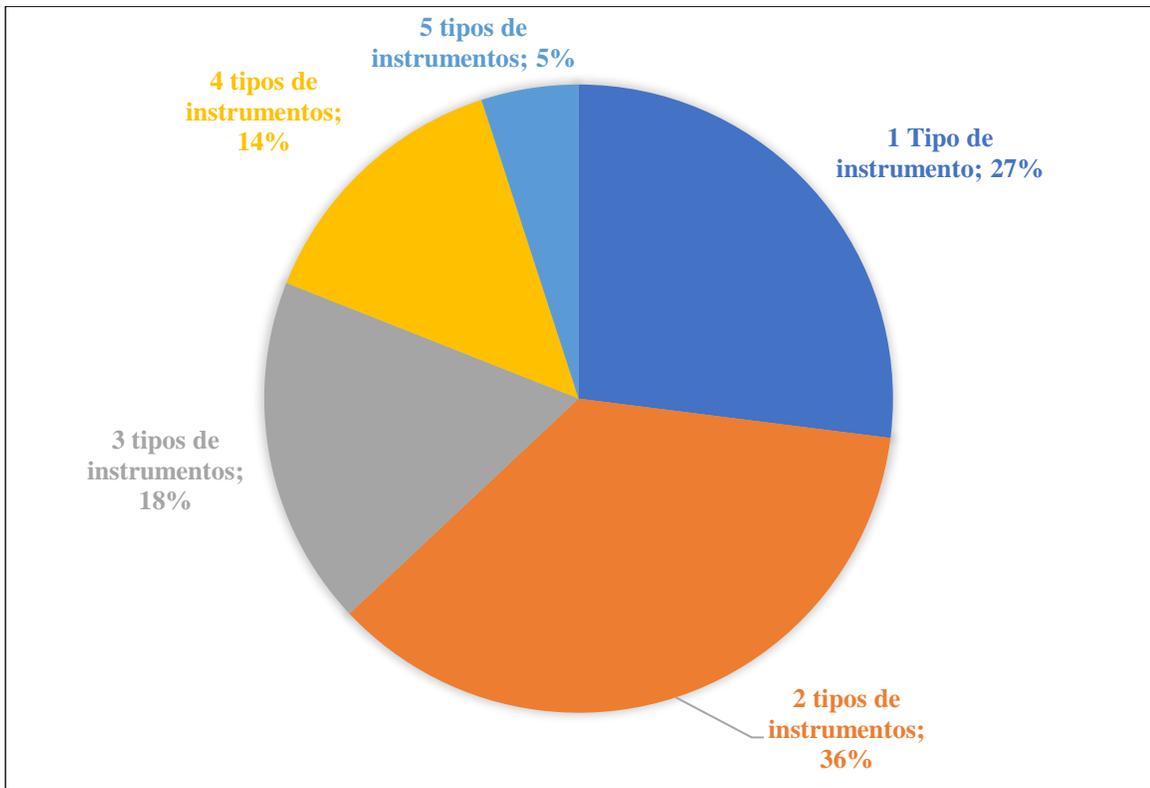
En la Tabla 69 se indica que el 100% de los depósitos revisados monitorea mediante diversos instrumentos las deformaciones producidas en el muro. En la Figura 39 se presenta un gráfico con los diversos instrumentos utilizados y el porcentaje de depósitos que lo utilizan.

En la Figura 39 se presenta los distintos tipos de métodos utilizados para monitorear las deformaciones con el porcentaje de depósitos que los utiliza. Como se puede observar, el método más utilizado para monitorear las deformaciones y/o asentamientos es la topografía. Este método requiere de prismas topográficos o monolitos, permitiendo monitorear solo puntos superficiales. Por otra parte, el radar de estabilidad de taludes se utiliza en el 18% de los depósitos mientras que el satélite (LiDAR o InSAR) en un 46%. Estos métodos, aunque menos precisos que la topografía, realizan mediciones asociadas a áreas de control permitiendo entender de forma global las deformaciones en el muro. Además, se puede notar que solo un 5% de los depósitos utilizan las celdas de asentamientos para el monitoreo de deformaciones. Según Igor Bravo, CEO de Geosinergia (una de las empresas de instrumentación geotécnica más grande de Chile) esto se debe a que, a medida que el muro se deforma (debido a la carga generada por el aumento en el tamaño del muro) llega un momento en que el instrumento deja de funcionar o se pierde su sensor.



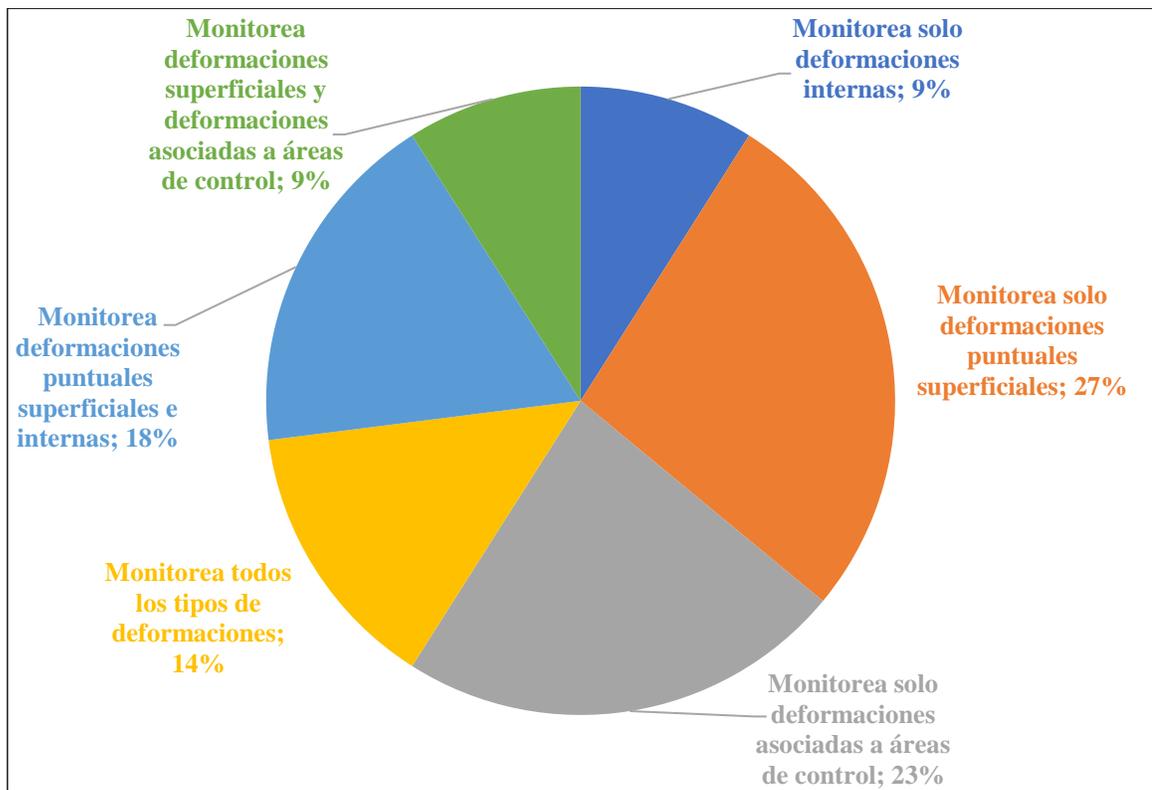
**Figura 39: Gráfico con el porcentaje de depósitos que tiene instalado diversos tipos de instrumentación para el monitoreo de deformaciones.**

En la Figura 40 se presenta la cantidad de diferentes tipos de instrumentos para el monitoreo de deformaciones y/o asentamientos. Como se puede observar, el 27% de los depósitos incluye un solo tipo de instrumentación, esto nos indica que un 27% de los depósitos no tienen sistemas de monitoreo de deformaciones redundantes que permitan integrar la información y aumentar la confianza de las mediciones.



**Figura 40: Cantidad de tipos de instrumentación de monitoreo de deformaciones.**

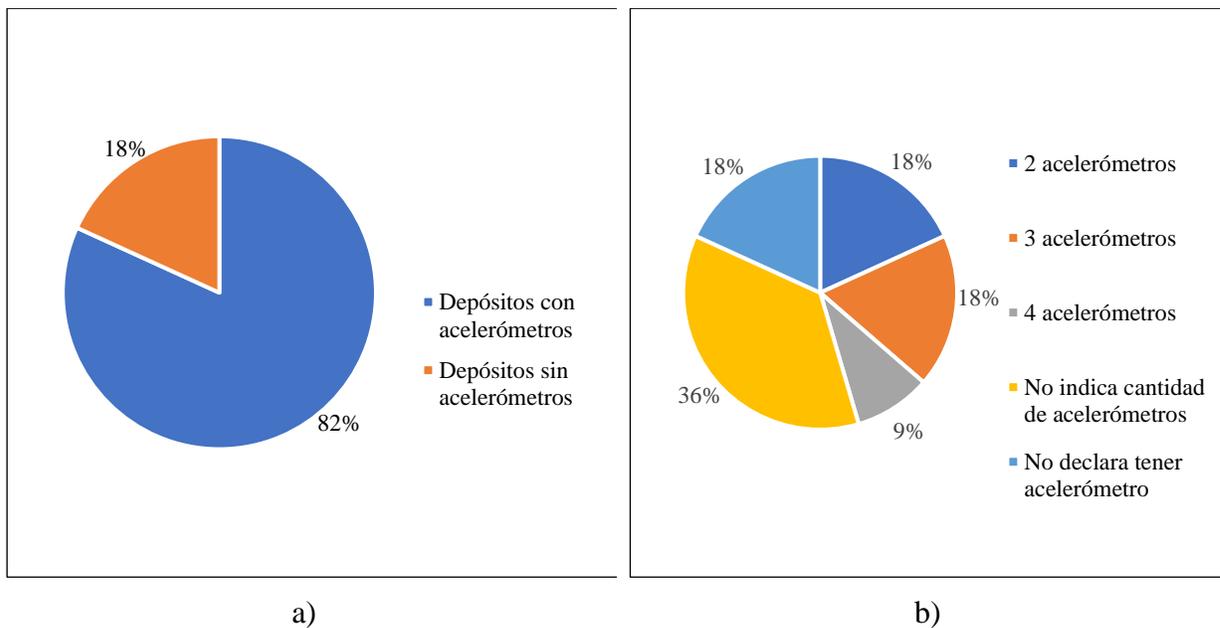
Por otra parte, en la Figura 41 se muestra el tipo de deformaciones (puntuales superficiales, internas o deformaciones asociadas a áreas de control) que se monitorea con la instrumentación declarada. Como se puede notar, solo el 14% de los depósitos posee instrumentación que les permite monitorear tanto deformaciones puntuales (superficiales e internas) como deformaciones asociadas a áreas de control, mientras que un 59% de los depósitos monitorea solo un tipo de deformaciones.



**Figura 41: Porcentaje de depósitos que monitorea los diferentes tipos de deformaciones.**

#### 5.1.4 Aceleraciones sísmicas

Para medir las aceleraciones sísmicas en los depósitos de relaves, normalmente se utilizan los acelerómetros. A continuación, se presenta un gráfico con el porcentaje de depósitos que posee acelerómetros (Figura 42 (a)). Como se puede observar, el 82% de los depósitos monitorea las aceleraciones sísmicas. Por otra parte, en la Figura 42 (b) se muestra el porcentaje de depósitos que declaró tener 2, 3 o 4 acelerómetros (recordando que normalmente se requieren 3 acelerómetros para poder medir la aceleración del muro). Además, se incluye el porcentaje de depósitos que no declararon la cantidad de acelerómetros y aquellos que declararon no tener ningún acelerómetro.



**Figura 42: a) Porcentaje de depósitos de relaves que poseen acelerómetros. b) Distribución de la cantidad de acelerómetros.**

### 5.1.5 Esfuerzos totales

El 100% de los depósitos declaró no tener instrumentación para el monitoreo de esta variable geotécnica. Esto se debe a que, en la práctica, los instrumentos utilizados para la medición de esfuerzos totales no son lo suficientemente aptos para las condiciones presentes en los depósitos de relaves. Como se revisó en la sección 3.1.4, las principales limitaciones de las celdas de presión (instrumento que mide esfuerzos totales) son daños al instrumento debido a la sobrecarga durante la compactación del suelo, cambios en las lecturas debido a que el relleno puesto sobre el instrumento cambia su orientación inicial y cambios en las mediciones debido a las concentraciones de tensión en los bordes de la celda. Estas limitaciones junto con la ubicación del instrumento (en la base del muro) ha producido que una vez que hayan dejado de funcionar, sea imposible cambiar o instalar nuevos instrumentos.

### 5.1.6 Condiciones climáticas

Según la información recolectada ningún depósito declaró tener instrumentación que permita conocer las condiciones climáticas en la zona del depósito de relaves.

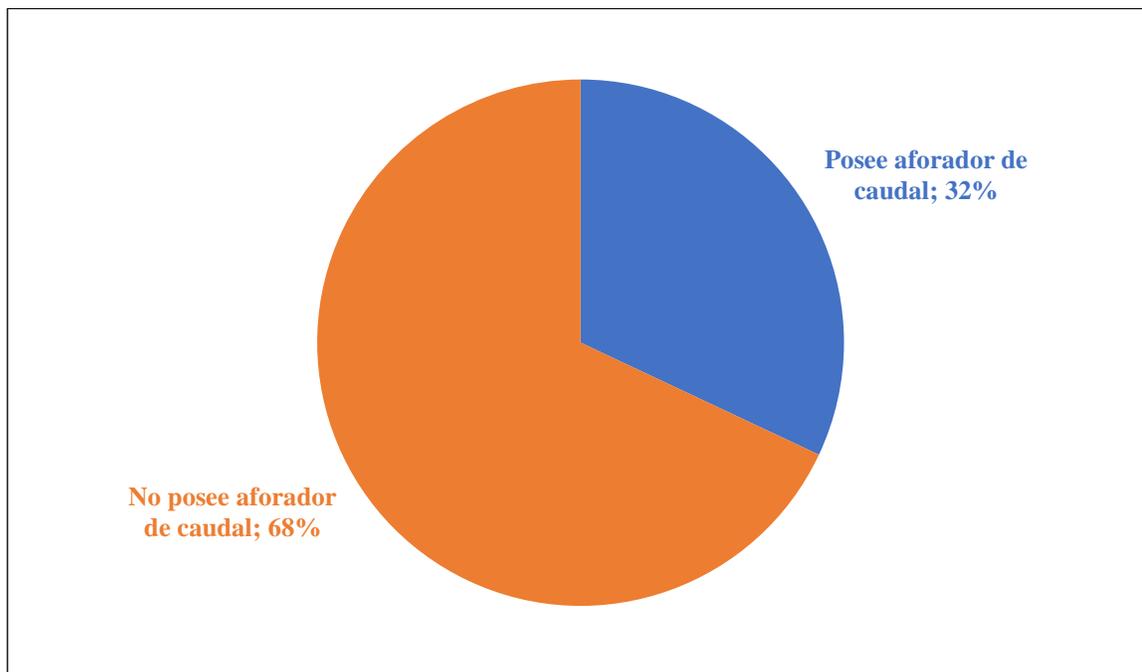
### 5.1.7 Revancha

La revancha es una de las variables que se solicita incluir en el Formulario E-700, por lo tanto, debería ser monitoreada por el 100% de los depósitos de relaves. Revisada la información recolectada se comprobó que el 100% de los depósitos la mide a excepción del Depósito de Arenas, (Quebrada Caserones) para el cual la revancha no es una variable que aplique.

Como se mencionó en la sección 4.1.1, según el artículo 49 del Decreto Supremo N°248, la revancha en los depósitos de relaves debe ser, como mínimo, de 1 metro. De la información recolectada un 29% define como revancha mínima del muro 1 m, mientras que el 71% de los depósitos, define dentro de sus parámetros de diseño un valor de revancha superior a la permitida por el decreto. Cabe mencionar que el Decreto Supremo N°35 en el artículo 77 indica que la revancha hidráulica se calculará mediante la suma de diversos factores (revisar sección 4.1.2), y para casos en que se obtengan valores inferiores a 1,0 metros, se debe adoptar 1,0. Además se menciona que depósitos de relaves clasificados como categoría 3 o 4, podrán adoptar la revancha hidráulica mínima igual a 1,5 metros, sin necesidad de cálculos.

### 5.1.8 Caudal

Como se mencionó en la sección 5.1.2 los aforadores de caudal normalmente se ubican en el sistema de drenaje. A continuación, se presenta la gráfica de distribución de los depósitos que declararon poseer instrumentación para el monitoreo de caudal. En la Figura 43 se observa que solo el 32% de los depósitos revisados en el capítulo 4.3 declara tener aforador de caudal.

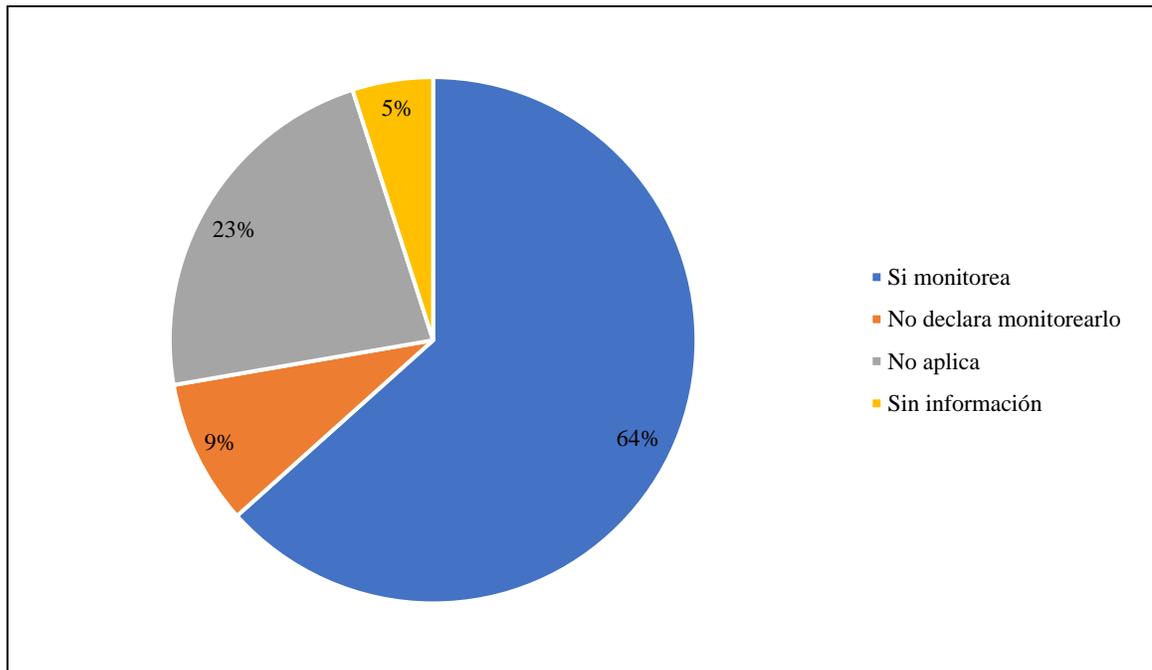


**Figura 43: Distribución de depósitos que monitorean caudal.**

### 5.1.9 Distancia a la laguna de aguas claras

Al igual que la revancha, la distancia a la laguna de aguas claras es una de las variables a incluir en el Formulario E-700, por lo tanto, se espera que el 100% de los depósitos que posean lo declaren. En la Figura 44 es posible notar que el 64% de los depósitos monitorea la distancia a la laguna, un 9% de depósitos pese a tener laguna no declara monitorearlo, un 23% de los depósitos no posee lagunas de aguas claras, y finalmente no se tiene información del 5% restante. Cabe mencionar que algunos depósitos pese a mencionar que monitorean la variable en la página web de Consejo

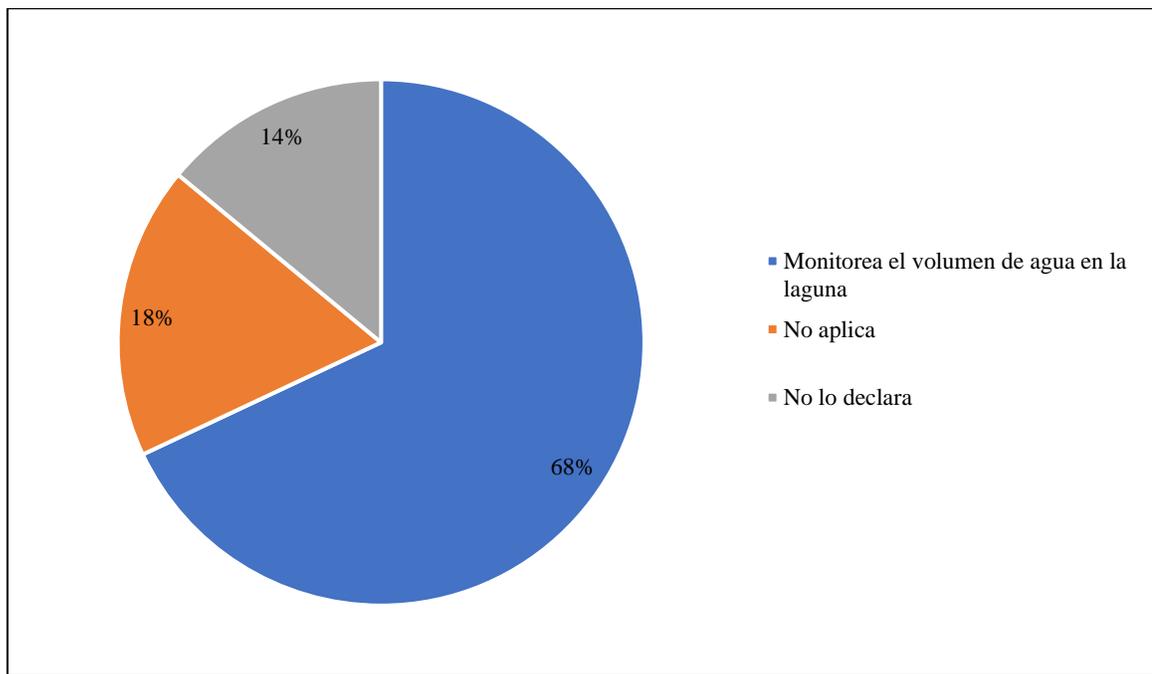
Minero no la declaran en el formulario E-700, lo que podría deberse a que la monitorean en periodos mayores a 3 meses.



**Figura 44: Distribución de monitoreo de distancia a la laguna de aguas claras.**

#### **5.1.10 Volumen de agua en la laguna**

El volumen de agua en la laguna se declaró en la página de Consejo Minero, sin embargo, no es una información que se solicite en el formulario E-700, por lo que no fue posible complementar la información. En la Figura 45 se observa que el 68% de los depósitos monitorea esta variable, el 18% no posee laguna de aguas claras, por tanto, el volumen no es una variable para considerar y el 14% de los depósitos que posee lagunas no declaró monitorearla. Finalmente, como se mencionó en la Tabla 69 el 83% de los depósitos que poseen laguna de aguas claras declaró monitorear esta variable.



**Figura 45: Distribución del monitoreo del volumen de agua en la laguna.**

En base a lo observado en este catastro, es posible plantear una propuesta metodológica que rescate aquellos métodos de monitoreo que son un aporte a los sistemas de instrumentación actuales e incluir nuevas metodologías (revisadas en la sección 2.7) que permitan mejorar la cobertura de los modos de falla. Además, esta propuesta debe considerar las deficiencias relacionadas a las plataformas de monitoreo que existen en la actualidad (revisadas en la sección 4.4), principalmente relacionadas a la falta de metodologías que permitan la integración de las diferentes variables geotécnicas y la incorporación de análisis de riesgo.

## **6 Propuesta Metodológica Avanzada de Instrumentación y Monitoreo de Depósitos de Relaves**

En este capítulo se propone una metodología de instrumentación y monitoreo geotécnico para los depósitos de relaves, mediante la utilización de métodos invasivos, semi invasivos y no invasivos que permitan monitorear las variables geotécnicas tanto de forma puntual como asociados a áreas de control a frecuencias de monitoreo consistentes con el desarrollo de los distintos modos de fallas.

Esta propuesta de monitoreo busca en primer lugar, garantizar la seguridad de los trabajadores y la población cercana mediante sistemas de instrumentación que permitan la generación de alertas ante un comportamiento anómalo del depósito. Para esto, es necesario ubicar la instrumentación estratégicamente con el fin de validar los supuestos de diseño y monitorear aquellas zonas de interés que son particulares de cada proyecto. Según Zúñiga et al. (2021), antes de definir un sistema de monitoreo, los depósitos deben evaluarse en busca de posibles mecanismos de falla y las condiciones que deben estar presentes para activar el mecanismo. El objetivo es evitar que la evolución de estas condiciones alcance valores tales que favorezcan el avance progresivo de cualquier mecanismo de falla dado.

Para generar un sistema de instrumentación robusto y redundante este debe contar con diversos tipos de instrumentos para el monitoreo de una misma variable, ya que distintos instrumentos fallan de forma distinta y poseen distinta vida útil. Se debe incluir instrumentos (o métodos de monitoreo) que tengan distintos alcances y precisiones (normalmente los instrumentos con mayor alcance tienen menor precisión, pero sirven para entender el comportamiento del depósito de forma amplia). Además, se espera tener al menos un tipo de instrumento con generación de alarmas tempranas para el monitoreo de niveles freáticos y/o presiones de poros, filtraciones y deformaciones.

Se recomienda la utilización de un sistema en línea en tiempo real que permita realizar el análisis (de forma individual e integrada) de datos de forma rápida y eficiente (la instrumentación geotécnica es valiosa solo en caso de que se realicen análisis necesarios para la identificación de posibles fallas).

A continuación, se realiza la propuesta metodológica de instrumentación considerando los puntos anteriormente mencionados.

### **6.1 Monitoreo de nivel freático y presiones de poros**

El nivel freático y las presiones de poros son las variables geotécnicas más importantes a monitorear en los depósitos de relaves, ya que el aumento de estas variables debido a diversos eventos gatilladores como por ejemplo un evento sísmico, lluvias o el colapso del sistema de drenaje, entre otros, pueden provocar diferentes modos de falla. Como se revisó en la sección 2.5, el nivel freático es un indicador directo para el monitoreo en el desarrollo fallas por inestabilidad

de taludes y rebalse, mientras que es un indicador de apoyo para el monitoreo en el desarrollo de licuación sísmica, erosión interna y capacidad de soporte. Por otra parte, las presiones de poros son un indicador directo para el monitoreo de fallas por inestabilidad de taludes y capacidad de soporte mientras que son un indicador de apoyo para el monitoreo en el caso de licuación sísmica y erosión interna. Debido a la forma de monitorearse (ambas mediante piezómetros) estas variables se revisan juntas.

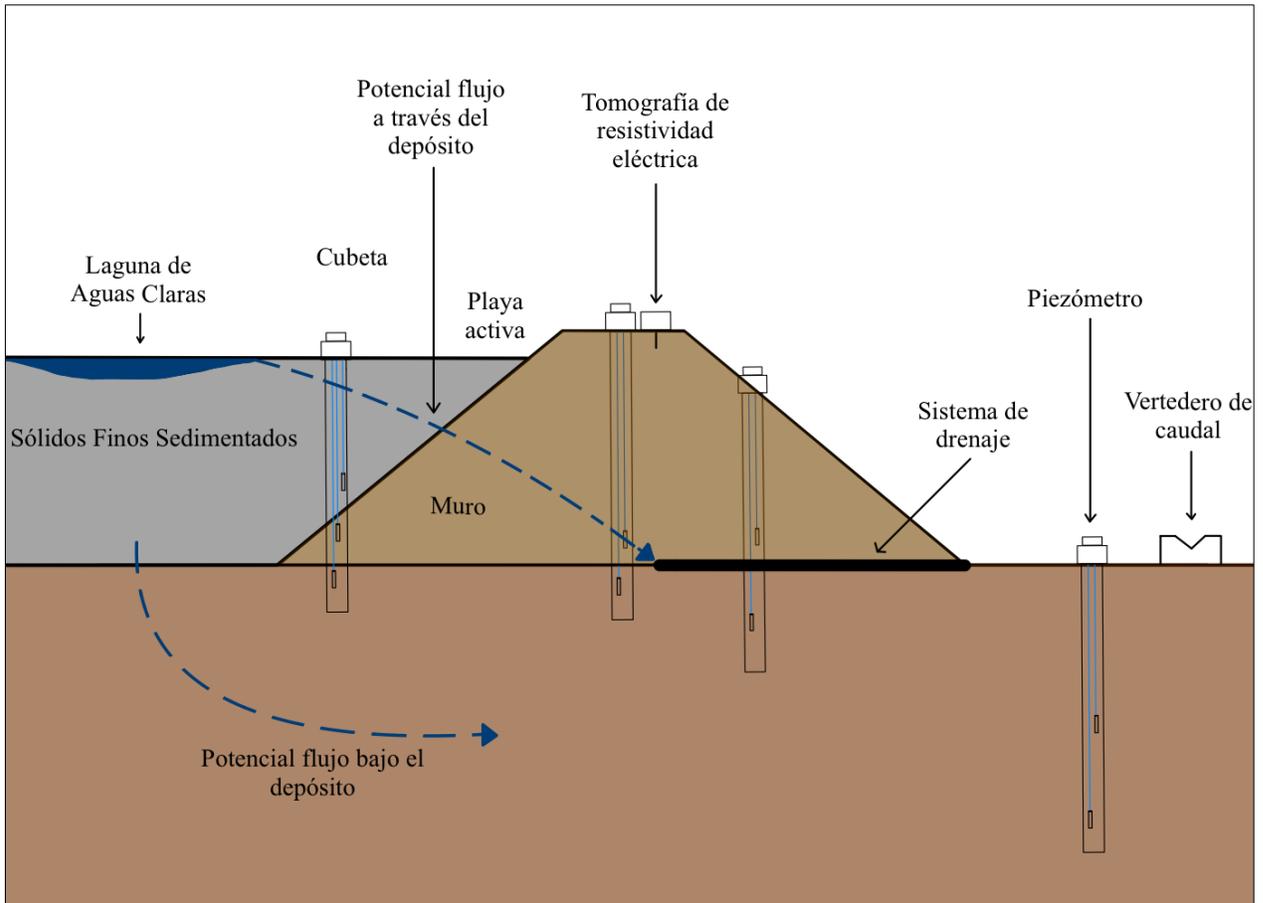
En relación con la frecuencia de monitoreo, para realizar un seguimiento eficiente de los potenciales cambios en las presiones de poros, se sugiere realizar múltiples mediciones diarias. Además, a modo general se recomienda:

- La utilización de sensores que permitan medir las presiones de poros.
- Piezómetros dispuestos de manera tal que permitan definir el flujo de agua (ver Figura 46), preferentemente deben estar instalados bajo el nivel freático, ya que es la forma más confiable en que operan.
- Instalar múltiples piezómetros dentro de un pozo para monitorear el perfil de presiones de poros.
- Incluir piezómetros de Casagrande con un sensor de nivel para medición automática. Son los únicos a los que se puede verificar de forma manual su funcionamiento.
- Incluir piezómetros dinámicos, ya que permiten monitorear las presiones de poros durante e inmediatamente posterior a un evento sísmico. Se sugiere la utilización de piezómetros piezo-resistivos, puesto que permiten medir a altas frecuencias de manera confiable.

Cabe destacar, la importancia de controlar tanto la velocidad como las aceleraciones con que ocurren los cambios de presiones de poros, ya que conocer estas tendencias, permiten generar alertas tempranas de forma oportuna.

## **6.2 Monitoreo de filtraciones**

Como se revisó en la sección 2.5, las filtraciones mayores a las consideradas en el diseño son un indicador directo para el monitoreo de la inestabilidad de taludes, erosión interna y de capacidad de soporte. Mientras que para licuación sísmica se consideran como un indicador de apoyo. Considerando la influencia que esta variable tiene sobre los diversos modos de falla, se propone la utilización de los siguientes métodos de monitoreo:



**Figura 46: Esquema conceptual propuesto de monitoreo de nivel freático, presiones de poros y filtraciones. Elaboración propia.**

Como se observa en la figura anterior, la propuesta de monitoreo consta de:

1. **Piezómetros.** Automáticos en tiempo real que permitan monitorear las variaciones en parámetros que apoyen la identificación de filtraciones, como cambios bruscos en el nivel freático y/o presión y sea capaz de generar alarmas tempranas en caso de sobrepasar cierto umbral (en los niveles piezométricos). Se deben ubicar aguas abajo del muro y cerca al sistema de drenaje (para verificar su correcto funcionamiento).
2. **Caudalímetro de tubería o vertedero de aforo.** Se deben ubicar al final del sistema de drenaje, puesto que el aumento del caudal en este indica que las filtraciones son mayores. Se debe elegir uno o el otro dependiendo del sistema de drenaje utilizado en cada proyecto.
3. **Pozos de monitoreos piezométricos.** Se deben ubicar aguas abajo del muro y cerca al sistema de drenaje. Este método de monitoreo, aunque deba medirse de manera manual, funciona como sistema redundante (permiten verificar que los resultados obtenidos mediante los piezómetros son correctos o que pueda usarse en caso de que los piezómetros fallen).
4. **Tomografía de resistividad eléctrica (ERT).** Consiste en la instalación de un sistema de monitoreo de filtraciones a largo plazo que permita generar alertas tempranas para la evaluación de filtraciones utilizando equipos ERT. Con este método es posible mapear las zonas heterogéneas que son de interés particular en el muro. Su alcance es de hasta 200m de profundidad y +3000 de longitud (Córdova & Bari, 2021). Se debe ubicar en el eje

longitudinal del coronamiento del muro de contención. La relevancia de este método es que permite conocer que ocurre en zonas superiores al nivel freático (a diferencia de los métodos anteriores).

Se recomienda que los piezómetros y/o el sistema de monitoreo en línea ERT sean capaces de activar alarmas tempranas sobrepasados ciertos umbrales definidos por el proyecto de ingeniería. Con respecto a la frecuencia de monitoreo, al igual que en el caso del nivel freático y las presiones de poros, se sugiere trabajar con promedios diarios.

Cabe mencionar, que el sistema de instrumentación debe ser acompañado de inspecciones visuales de rutina que permitan identificar posibles indicadores de fallas.

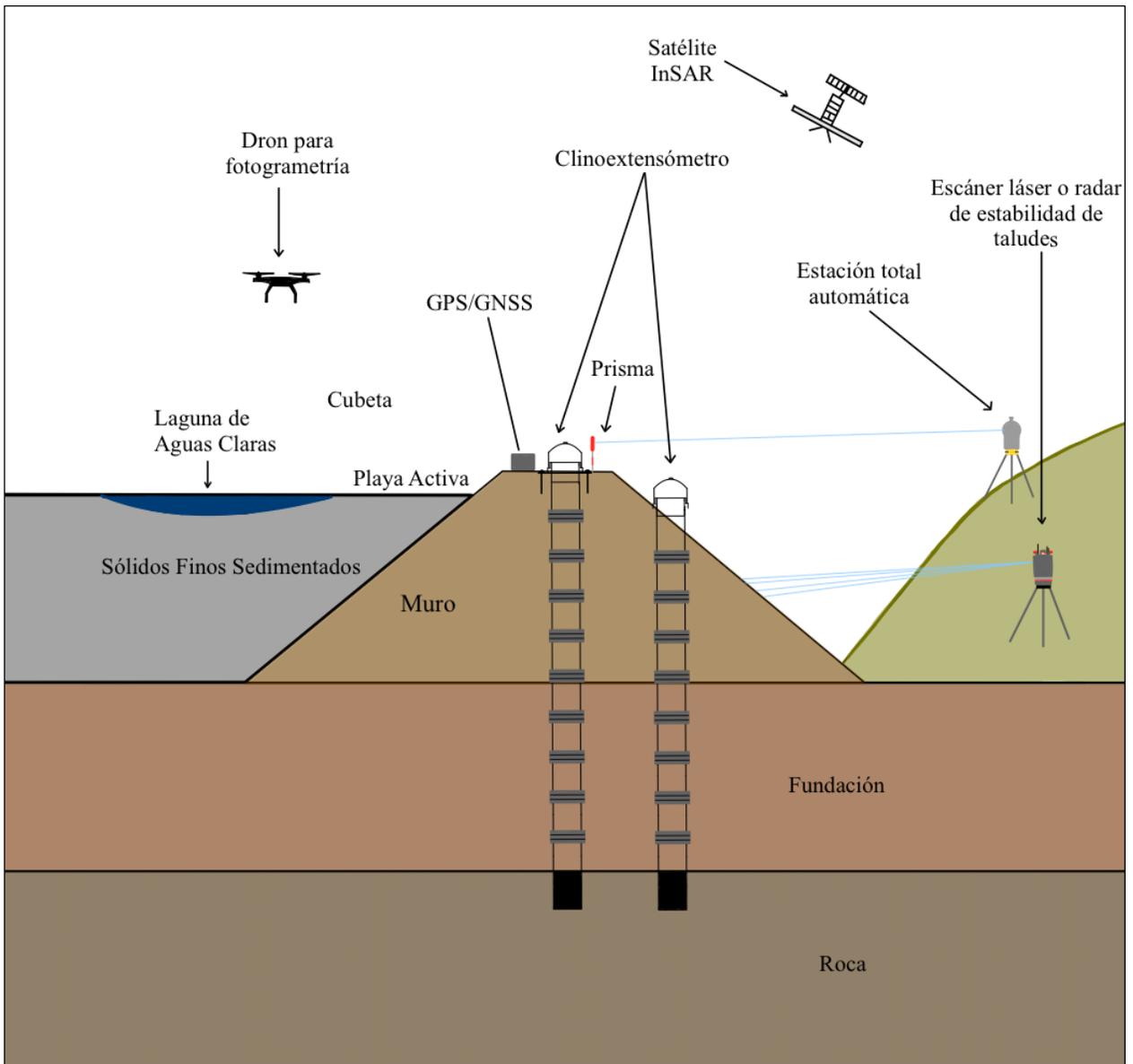
Se recomienda tener registros históricos de las filtraciones. De esta forma se podrá identificar cuando las filtraciones tengan variaciones significativas. Igualmente, se espera que la frecuencia de monitoreo de la instrumentación aumente ante condiciones meteorológicas que puedan generar un incremento en las filtraciones.

### **6.3 Monitoreo de deformaciones**

En la sección 2.5 se indicó que las deformaciones son indicadores directo para el monitoreo de fallas por inestabilidad de taludes y capacidad de soporte, mientras que son un indicador de apoyo para el monitoreo en los modos de falla de licuación sísmica, rebalse y erosión interna.

Para poder prevenir el desarrollo de los diversos mecanismos de falla, el sistema de instrumentación para el monitoreo de deformaciones y asentamientos debiese contar con instrumentos que permitan monitorear deformaciones superficiales puntuales (para controlar los asentamientos), deformaciones internas (para entender cómo se están desarrollando las deformaciones al interior del muro) y deformaciones asociadas a áreas de control (para poder identificar cuáles son las zonas de interés). Estas deformaciones se pueden monitorear mediante métodos invasivos, semi invasivos o no invasivos. Además, como se mencionó en la sección 4.4, es fundamental monitorear tanto la velocidad como las aceleraciones de las deformaciones, puesto que permiten indicar alertas tempranas de forma oportuna.

Con respecto a las frecuencias de monitoreo, estas deben ser tal que permitan identificar el inicio del desarrollo de una falla, por lo que se recomienda realizar mediciones de deformaciones de forma diaria. A continuación, se propone la utilización de los siguientes métodos de monitoreo (ver Figura 47).



**Figura 47: Esquema conceptual propuesto de monitoreo de deformaciones. Elaboración propia.**

Como se observa en la figura anterior, la propuesta de monitoreo consta de:

1. **Cli-noextensó-metros.** Se recomienda este instrumento para monitorear tanto asentamientos en el muro (perfil de asentamientos) como las deformaciones horizontales. Este instrumento debe estar fijo a la roca para que las mediciones sean efectivas. Se recomienda instalar cli-noextensó-metros en el talud de aguas abajo del muro (pueden ser inclinados o verticales). Esto permite identificar la ubicación y la superficie de deslizamiento de una falla por inestabilidad de taludes.
2. **GPS/GNSS:** Se sugiere su utilización en el coronamiento del muro para el monitoreo de las deformaciones superficiales, en especial de los asentamientos, los cuales son un indicador del desarrollo de una falla tanto por capacidad de soporte como por inestabilidad de taludes. Se recomienda este instrumento debido a sus ventajas revisadas en la sección 3.1.3, donde se destacan su alta precisión en distancias muy largas, su funcionalidad bajo cualquier condición climática y que permite el monitoreo en línea.

En caso de requerir una cantidad considerable de puntos para el monitoreo de asentamientos en el coronamiento del muro se recomienda, siempre que el terreno lo permita, la utilización de una estación total automática.

3. **Estación total automática.** Como se revisó en la sección 3.2.2, este instrumento, posee un alto nivel de precisión, un alcance de 1,5 a 7000 m, permite la obtención en tiempo real de los datos y la generación de alarmas en caso haber sobrepasado los umbrales definidos. Cabe mencionar este instrumento requiere de prismas de control topográfico para su medición, debe estar ubicado (de preferencia de forma fija) en una zona en altura para las mediciones de asentamientos en el coronamiento ya que requiere tener visibilidad directa con los prismas y no se debe utilizar en condiciones meteorológicas adversas puesto que afecta las mediciones.
4. **Escáner laser o radar de estabilidad de taludes.** Para monitorear los desplazamientos en el talud y predecir de esta forma la falla por inestabilidad de taludes se recomienda la utilización de uno de estos instrumentos según las características del proyecto. Como se revisó en la sección 3.2.2, ambos instrumentos poseen alcances similares (entre 3500 a 6000 m dependiendo del modelo), sin embargo, la gran desventaja del escáner laser es que las condiciones climáticas pueden afectar sus mediciones, mientras que el radar de estabilidad de taludes disminuye su precisión en presencia de vegetación.
5. **InSAR, LiDAR o fotogrametría.** Para el monitoreo asociadas a áreas de deformaciones se recomienda la utilización de tecnología LiDAR, InSAR o fotogrametría dependiendo de las características del depósito y su disponibilidad. Se debe considerar que al ser satelital los tiempos de monitoreo pueden ser mayores a las de otros instrumentos (de días o semanas dependiendo del satélite a utilizar) y la precisión en comparación a otros métodos es menor, sin embargo, la gran ventaja es que abarcan grandes áreas (mucho mayores a que un escáner laser o un radar de estabilidad de taludes) lo que permite identificar a una gran escala las zonas de interés. Como se revisó en la sección 3.3.1, la principal desventaja del InSAR es la limitada visibilidad en áreas inclinadas, por otra parte, LiDAR no es apta para presas de relaves construidas con el método de aguas abajo debido a su constante expansión y finalmente la fotogrametría se debe realizar en presencia de luz. Cabe mencionar que los tres métodos de monitoreo disminuyen su precisión en presencia de vegetación, mientras que solo InSAR permite medir en condiciones climáticas adversas.

#### 6.4 Monitoreo de aceleraciones sísmicas

Como se mencionó en la sección 2.5, las aceleraciones sísmicas son un indicador para el monitoreo de todos los modos de fallas, en particular, son un indicador directo para el monitoreo de la licuación sísmica, la inestabilidad de taludes y la erosión interna. Considerando además que Chile es un país sísmico, la instrumentación para su monitoreo toma un papel particularmente relevante. Sin embargo, hasta la fecha no se encontraron otros métodos (más avanzados) que los ya utilizados para el monitoreo de aceleraciones sísmicas.

Teniendo en consideración el punto anterior, para el monitoreo de aceleraciones sísmicas se recomienda (como se mencionó en la sección 2.7.1.9) la utilización de 3 acelerómetros (instrumentos invasivos), uno ubicado en el coronamiento del muro, con el fin de analizar la respuesta sísmica del muro, otro ubicado aguas abajo del muro, con el objetivo de estudiar la

respuesta del suelo y finalmente otro en roca. Con relación a la frecuencia de monitoreo esta debe ser en tiempo real.

## **6.5 Monitoreo de esfuerzos totales**

En la sección 2.5 se indicó que las variaciones en los esfuerzos totales del muro de contención son un indicador directo para el monitoreo en el desarrollo de una falla tanto de inestabilidad de taludes como de capacidad de soporte. Además, en la sección 2.5.6 se mencionó que los esfuerzos totales se miden con el objetivo de corroborar los supuestos considerados inicialmente. Sin embargo, como se mencionó en la sección 5.1.5 actualmente no existe instrumentación confiable para el monitoreo de esfuerzos totales en depósitos de relaves debido a las condiciones presentes en el depósito.

## **6.6 Monitoreo de las condiciones climáticas**

En la sección 2.5 se indica que las condiciones climáticas son un indicador directo para el monitoreo en el desarrollo de falla por rebalse y son un indicador de apoyo de los demás tipos de fallas definidos (licuación sísmica, inestabilidad de taludes, erosión interna y capacidad de soporte), por tanto, el monitoreo de esta variable se considera relevante.

Se propone la utilización de una estación meteorológica automática (método semi invasivo) en las cercanías del depósito de relaves, ya que permite conocer las condiciones climáticas de la zona, en particular posibles variaciones del nivel freático debido a eventos climáticos. Se espera que la estación meteorológica automática permita medir como mínimo la velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad y la lluvia e intensidad de lluvia.

## **6.7 Monitoreo de revancha**

Como se mencionó en la sección 2.5.7 la revancha es un indicador directo para el monitoreo de la falla por rebalse. El seguimiento de esta variable puede hacerse mediante:

- Instalación de limnímetros en el talud de aguas arriba del muro a medida que este va creciendo.
- Imágenes satelitales
- Fotogrametría mediante dron

Se recomienda la utilización de fotogrametría mediante dron o imágenes satelitales, con una frecuencia de medición semanal, la que debería aumentar ante eventos climáticos como lluvias intensas. De forma complementaria se sugiere realizar inspecciones visuales.

## **6.8 Monitoreo de caudal**

Como se indica en la sección 2.5, esta variable es un indicador directo para el monitoreo de las fallas por inestabilidad de taludes, erosión interna y capacidad de soporte, mientras que es un indicador de apoyo para el monitoreo de licuación sísmica. Como se revisó en la sección 2.5.8 a través del monitoreo del caudal es posible evaluar la eficiencia del sistema de drenaje y correlacionar estos valores con incrementos del volumen de la laguna y los registros piezométricos.

El monitoreo de esta variable se realiza a través de caudalímetros o vertederos de aforo, en las ubicaciones indicadas en la sección 6.2.

## **6.9 Monitoreo de la distancia a la laguna de aguas claras**

En la sección 2.5 se indica que esta variable es un indicador directo para el monitoreo de fallas por inestabilidad de taludes, erosión interna y capacidad de soporte, mientras que es un indicador de apoyo para el monitoreo de licuación sísmica y rebalse. Además, en la sección 2.5.9 se indica que la importancia del monitoreo de esta variable radica en que mientras más cerca esté la laguna de aguas claras al muro de contención, es más probable que el muro no impermeabilizado por la cara de aguas arriba se sature, generando un aumento en las presiones de poros lo que podría desencadenar un colapso del muro.

Para el monitoreo de distancia a la laguna de aguas claras se propone la utilización de métodos no invasivos, como tecnología LiDAR o InSAR mediante satélite o dron. Según Finke K (2022) normalmente estas mediciones se hacen de la mano con el levantamiento batimétrico para lograr una recopilación de datos precisa del depósito de relaves.

## **6.10 Volumen de agua en la laguna**

Como se revisó en la sección 2.5, el volumen de agua en la laguna es un indicador directo para el monitoreo de fallas por rebalse y es un indicador de apoyo para el monitoreo de los demás modos de falla (licuación sísmica, inestabilidad de taludes, erosión interna y capacidad de soporte)

Como se mencionó anteriormente, para medir el volumen de agua en la laguna es necesario realizar un levantamiento batimétrico. Esto se puede realizar mediante un bote tripulado, un bote no tripulado operado de forma remota (métodos semi invasivos) o mediante satélite. Se recomienda realizar estas mediciones mediante un bote no tripulado por su precisión, su disponibilidad en tiempo real, porque toma un menor tiempo y costo (comparado al bote tripulado) y no está limitado por la profundidad (diferencia de las mediciones mediante satélite).

## 6.11 Plataforma de monitoreo

Para lograr un sistema robusto y avanzado, la clave está en implementar un sistema global y completo, como el propuesto en el presente capítulo. Sin embargo, debido a la gran cantidad de datos que recopilan los diversos instrumentos es necesario la utilización de alguna plataforma que permita recolectar la información, procesarla y visualizarla en línea en tiempo real. Las principales características esperadas en una plataforma son:

- **Ser suficientemente seguras:** hoy en día, el estado de los depósitos de relaves se considera controversial debido a las grandes consecuencias que puede haber ante una eventual falla, por tanto, para prevenir la mal utilización de estos datos se requiere que la información esté segura.
- **Permitir definir umbrales y en caso de excederlos generar alarmas:** para identificar cuando las variables han sufrido variaciones más allá de las esperadas, se definen umbrales. En caso de excederse, se espera que el personal autorizado de minería sea notificado a la brevedad mediante mensajes de texto, email y /o WhatsApp.
- **Permitir visualizar la información:** Para facilitar la revisión e interpretación de los datos recolectados se espera tener acceso a diferentes tipos de mapas y gráficos mediante la configuración de diversos parámetros y el periodo de interés.
- **Integrar la información:** el sistema de instrumentación propuesto monitorea las diversas variables de forma individual, sin embargo, para poder monitorear de forma compleja los diversos modos de fallas es necesario integrar la información. Esta integración normalmente es realizada por los ingenieros de proyecto. Sin embargo, debido a la gran cantidad de información recolectada por la instrumentación actual, esta labor cada vez se hace más compleja. En este sentido, surge la necesidad de implementar metodologías que a través de plataformas de monitoreos permitan integrar la información recolectada.

Cabe destacar la importancia de relacionar los resultados de análisis con las etapas de construcción en la que se encuentra el depósito de relaves para no mal interpretar la información.

## 7 Conclusiones

A través de la revisión del estado de la práctica en depósitos de relaves en Chile fue posible realizar un análisis de las diversas variables geotécnicas que se monitorean y en base a sus ventajas y deficiencias proponer una metodología de instrumentación avanzada para el monitoreo de depósitos de relaves.

La información recolectada a través de la página web del Consejo Minero junto a los formularios E-700 (y sus anexos) solicitados al portal de transparencia permiten realizar el catastro de instrumentación en depósitos chilenos presentados en la sección 0. En este catastro se observa que existen grandes diferencias en términos de sistemas de monitoreos entre los distintos depósitos. Mientras en ciertos depósitos es posible observar sistemas redundantes y resistentes, en otros depósitos se aprecia una mínima cantidad de instrumentación, sobre todo a lo que respecta al monitoreo de deformaciones.

De los análisis realizados en los informes anexados al formulario E-700 y de las múltiples reuniones realizadas con Roberto Gesche, Igor Bravo y Gonzalo Corral, es posible observar que el seguimiento de las variables geotécnicas se realiza de forma individual y no de forma integrada como se esperaría. La importancia de integrar la información obtenida se debe principalmente a que como se revisó en la sección 2.5 la variación de las diversas variables pueden gatillar los diferentes modos de falla, por lo que la integración de los datos es fundamental para poder predecir el colapso del depósito.

Con respecto a los sistemas de instrumentación chilenos, se observa que el 100% de los depósitos de relaves monitorea el nivel freático y las presiones de poros. En relación con estas variables, es posible notar que la instrumentación enfocada al monitoreo de estas variables es la más robusta en términos de diferentes tipos de instrumentación (donde un 59% de los depósitos cuenta con 2, 3 o 4 tipos de instrumentos) y altas frecuencias de monitoreo (en su mayoría en línea). Con relación a las deformaciones, aunque el 100% de los depósitos monitoree esta variable, es posible notar un déficit en relación con la diversidad de instrumentación, en donde solo el 14% de los depósitos monitorea deformaciones superficiales puntuales, deformaciones internas y deformaciones asociadas a áreas de control.

Para lograr un sistema de monitoreo robusto y avanzado, la clave está en implementar un sistema de instrumentación global y completo que permita dar seguimiento al desarrollo de los modos de falla acompañado de una plataforma que permita visualizar la información de forma rápida y precisa, con el fin de tomar las decisiones críticas a tiempo y así evitar el colapso de depósitos de relaves. Sin embargo, el principal desafío está en entender a cabalidad la información obtenida a través del sistema de instrumentación. Para lograr esto, se destaca la importancia que tiene registrar de forma detallada la construcción y operación del depósito y su muro, dado que esta es necesaria para interpretar las condiciones físicas a través de los datos de monitoreo.

Con relación a los sistemas de información, durante el desarrollo de este trabajo se observa que sigue habiendo depósitos que utilizan herramientas como Excel para el procesamiento y análisis de datos. Además, pese a que no fue posible realizar un catastro de los depósitos que utilizan plataformas de monitoreo en Chile debido a la falta de información, como se revisó en la sección 2.9.1, un estudio realizado a nivel mundial indica que solo el 21% de los depósitos encuestados posee plataformas de monitoreo. Esto, indica que una gran debilidad de los sistemas de monitoreo actuales son la falta de plataformas que permitan visualizar e integrar la información de forma compleja, remota y en tiempo real.

Durante el desarrollo de este trabajo, se observan los cambios que actualmente están teniendo los sistemas de instrumentación en depósitos de relaves. Mientras algunos instrumentos como las celdas de asentamientos y de presiones van de salida debido a su poca aplicabilidad en depósitos, nuevos métodos se están incorporando para un monitoreo más completo de las variables geotécnicas como, por ejemplo, la tomografía de resistividad eléctrica en línea y los clinoextensómetros. Además, se destaca la gran cantidad de estudios chilenos revisados enfocados en nuevos métodos de monitoreo geotécnico en depósitos, donde se hace notar que Chile es un referente en el área.

Para el monitoreo de eventos sísmicos en los depósitos de relaves se revisa aceleración sísmica, sin embargo, en otras áreas, como en infraestructura, la variable que utilizan para relacionar los daños que se producen es la velocidad. Se espera que en un futuro se comience a utilizar la velocidad en depósitos debido a su impacto en las estructuras, para lo cual, se requeriría la utilización de geófonos para su medición (similar a lo que hacen en túneles).

## **7.1 Recomendaciones**

En base a los análisis realizados en el presente trabajo se recomienda para trabajos futuros:

- Hacer una metodología que permita integrar los diversos parámetros geotécnicos e implementar su aplicación en plataformas de monitoreos en línea. Se sugiere incluir gráficos que permitan visualizar la información y facilitar la interpretación de resultados. Además, se recomienda incorporar una función para definir umbrales y para generar alertas en caso se sobrepasarlos.
- Realizar una base de datos de instrumentación geotécnica en depósitos de relaves chilenos. Se sugiere incluir todos los depósitos en sus distintos estados (activos, inactivos, abandonados y en construcción) y categorizarlos por tamaño de depósitos (grandes, medianos y chicos). Esta información permitiría realizar diversos análisis sobre el estado actual de los sistemas de instrumentación en los depósitos de relaves. Cabe mencionar, que para lograr una base de datos completa, es necesario contar con el apoyo de las diversas empresas mineras, ya que de esta forma es posible obtener información completa y fidedigna del estado de los depósitos.

## 8 Bibliografía

- AMTC. (2018). *Estado del Arte de métodos de medición de parámetros necesarios para la evaluación de la estabilidad en depósitos de relaves*.
- Araya, V., Suazo, G., Villavicencio, G., & Silva, M. (2019). Monitoreo de la humedad en depósitos de relave a partir de mediciones de reflexión de luz. *Obras y Proyectos*, 25, 35–41. <https://doi.org/10.4067/s0718-28132019000100035>
- Ayu Putri, J. C., Fuad, M. A. Z., & Adi, M. A. A. (2018). Bathymetry Mapping Using Landsat 8 Multispectral Data of Bangsring Coastal Area. *Omni-Akuatika*, 14(1), 54–61. <https://doi.org/10.20884/1.oa.2018.14.1.368>
- Bery, A. A. (2016). Slope Monitoring Study Using Soil Mechanics Properties and 4-D Electrical Resistivity Tomography Methods. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 53(1), 24–29. <https://doi.org/10.1007/s11204-016-9359-7>
- Bravo, I. (2022). *Estado de la práctica en depósitos de relaves y perspectiva hacia el futuro*.
- Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations* (3rd edition). John Wiley & Sons,.
- Carlà, T., Intrieri, E., Raspini, F., Bardi, F., Farina, P., Ferretti, A., Colombo, D., Novali, F., & Casagli, N. (2019). Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR. *Scientific Reports*, 9(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55024-x>
- Carvajal, M. (2018). *Desarrollo de una metodología para análisis de estabilidad física de depósitos de relaves*. Universidad de Chile.
- Chen, C., & Liu, Z. (2017). Applications of Thermal Images for Monitoring Surficial Temperature Changes of Naked Slope. *Engineering and Technology Innovation*, 5, 37–40.
- Clarkson, L. (2021). *Comprehensive Monitoring Strategy for Tailings Dams*. University of Queensland.
- Colombo, D., & Macdonald, B. (2015). Using advanced InSAR techniques as a remote tool for mine site monitoring. *International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit and Civil Engineering*, 1–12. [http://tre-altamira.com/uploads/2015\\_InSAR\\_mine-site\\_monitoring.pdf](http://tre-altamira.com/uploads/2015_InSAR_mine-site_monitoring.pdf)
- Córdova, L., & Bari, J. (2021). Automated Permanent Monitoring of Seepage for Tailings Dams Using a Customized ERT System. *7th International Conference on Tailings Management*.
- Darrera. (2022). *Estación meteorológica*. <https://www.darrera.com/wp/es/producto/3r-aws100-estacion-meteorologica-automatica-ema/>
- Das, B. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (Cuarta edi, Issue 1). Cengage learning.

- Directindustry. (2021). *Limnómetro*. <https://www.directindustry.es/prod/meteo-omnium/product-72296-2256288.html>
- Dunnicliff, J. (1993). Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. In *John Wiley & Sons*.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., & Bell, G. (2005). Geotechnical Engineering of Dams. In *CRC press*.
- Finke, K. (Ed.). (2022). *Tailings management handbook: A life-cycle approach*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration.
- Geocom. (2021). *Escáner laser*. <https://www.geocom.cl/products/vz-400i>
- Geokon. (2022). *Piezómetros de cuerda vibrante*. [https://www.geokon.com/content/manuals/4500\\_Manual\\_de\\_Instrucciones.pdf](https://www.geokon.com/content/manuals/4500_Manual_de_Instrucciones.pdf)
- Geo-observations. (2022). *Shape Accel Arrays (SAA)*. <http://www.geo-observations.com/shape-arrays>
- Geosensor. (2022). *Bote no tripulado USV*. <https://www.geosensor.com.pe/productos/batimetría/barco-no-tripulado-usv-detail.html>
- Geosensor. (2021). *Celda de asentamiento de cuerda vibrante*. <https://www.geosensor.com.pe/productos/sensores-de-asentamiento/celda-de-asentamiento-de-cuerda-vibrantese-detail.html>
- Geosoluciones. (2022). *Bote no tripulado*. <https://www.geosoluciones.cl/batimetria/>
- Geotechdata. (2022). *Rod extensometer*. <http://www.geotechdata.info/monitoring/rod-extensometer>
- Geoteknik. (2021). *Acelerómetro de fuerza balanceada*. <https://geoteknik.com.pe/producto/acelerometro-de-fuerza-balanceada/>
- Groundprobe. (2021). *Radar de monitoreo de taludes*. <https://www.groundprobe.com/the-differences-between-real-aperture-radars-rar-and-synthetic-aperture-radars-sar/>
- GrupoAcre. (2021). *Prisma de control topográfico*. <https://grupoacre.pe/conoce-los-diversos-tipos-de-prismas-de-topografia-y-como-utilizarlos/>
- Hui, Shiqiang, Charlebois, L., & Sun, C. (2017). Real-time monitoring for structural health, public safety, and risk management of mine tailings dams. In *Can. J. Earth Sci.* Downloaded from [www.nrcresearchpress.com](http://www.nrcresearchpress.com) by GRAND VALLEY STATE UNIVERSITY on (Vol. 12). [www.nrcresearchpress.com](http://www.nrcresearchpress.com)
- Kremer, R. (2016). *Estudio para la implementación de una estación meteorológica automática en el campus San Joaquín de la UTFSM*.

- Lienhart, W. (2017). Geotechnical monitoring using total stations and laser scanners: critical aspects and solutions. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(3), 315–324. <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0228-5>
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Mainali, G., Nordlund, E., Knutsson, S., & Thunehed, H. (2015). Tailings dams monitoring in Swedish mines using self-potential and electrical resistivity methods. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 20(13), 5859–5875.
- Mine Safety and Health Administration (MSHA). (2010). *Engineering and Design Manual: Coal Refuse Disposal Facilities*. May 2009, 869.
- Ministerio de Minería. (2007). *Decreto Supremo N° 248. Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves*.
- Mollehuara, R., Kozlovskaya, E., Lunkka, J., & Pedretti, D. (2021). Leveraging Hydrogeophysics for In-Situ Monitoring of Tailings Facilities. *7th International Conference on Tailings Management*, 1–10.
- Mssdefence. (2022). *GPS*. <https://store.mssdefence.com/navigation/837-novatel-novatel-flexpak-s-gps-rtk-saasm-receiver-navigation.html>
- Onicon. (2021). *Caudalímetro*. <https://www.onicon.com/process/electromagnetic-flow-meters>
- Oommen, T., Bouali, E. H., & Wolf, R. E. (2019). *New Paradigm in Geotechnical Performance Monitoring Using Remote Sensing*. Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-0505-4\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0505-4_17)
- Pimentel, K., Vasconcelos, I., Mapa, B., Lage, D., & Costa, F. (2021). Towards the Development of an Effective Monitoring Program of Tailings Dams: The Vale Experience. *7th International Conference on Tailings Management*.
- Prasad, R., & Dixit, M. (2020). *Performance Monitoring Of Dams through Piezometers - A Case Study*. 2, 1–8.
- Psarropoulos, P. N., & Tsompanakis, Y. (2008). Stability of tailings dams under static and seismic loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(5), 663–675. <https://doi.org/10.1139/T08-014>
- Rstinstruments. (2021). *Extensómetros*. <https://rstinstruments.com/es/product-category/instruments/extensometers/>
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2022). *Datos públicos depósitos de relaves*. <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2021). *Preguntas Frecuentes Sobre Relaves*.

- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2021b). *Anuario de la Minería de Chile*.
- Sisgeo. (2021). *Celdas de presión*. <https://www.sisgeo.com/es/productos/celdas-de-presion/item/celdas-de-presion-de-tierra.html>
- Sisgeo. (2022). *Clinoextensómetro*. <https://www.sisgeo.com/products/extensometers/item/dex-and-dex-s-3d-extensometer.html#:~:text=The DEX-S extenso-inclinometer,to monitor the vertical displacements>.
- Sisgeo. (2021). *Extensómetros de varilla*. <https://www.sisgeo.com/es/productos/extensometros/item/mpbx-extensometros-de-varilla.html>
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos: Análisis geotécnico*. Universidad Industrial de Santander.
- Topoequipos. (2021). *Estación total*. <http://www.topoequipos.com/dem/que-es/terminologia/que-es-una-estacion-total>
- Villavicencio, G., Espinace, R., Palma, J., Fourie, A., & Valenzuela Pamela. (2013). *Failures of sand tailings dams in a highly seismic country*.
- Zhang, L., Peng, M., Dongsheng, C., & Xu, Y. (2016). *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment, First Edition*. John Wiley & Sons.
- Zúñiga, J., Suazo, G., & Villavicencio, G. (2021). Managing Risk of Tailings Storage Facilities through Surveillance , Monitoring and FMEA-Type Analysis. *7th International Conference on Tailings Management*.
- Zwissler, B., Oommen, T., Vitton, S., & Seagren, E. A. (2017). Thermal Remote Sensing For Moisture Content Monitoring of Mine Tailings: Laboratory Study. *Environmental and Engineering Geoscience*, 23(4), 299–312. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.23.4.299>