

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE

MATERIALES

SANTIAGO – CHILE



**“METODOLOGÍA DE GESTIÓN DE CONTROL
INTERNO PARA EL CUMPLIMIENTO DEL
REQUERIMIENTO 2.2 DEL GISTM, EN
MINERA SPENCE”**

María Paz Cisterna Venegas

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA
CIVIL DE MINAS**

Profesor Guía: Juan José Muñoz

Profesor co-referente: Víctor Encina Montenegro

Profesor Patrocinante: Rodrigo Estay Huidobro

Marzo – 2023

Esos sueños que se transforman en metas, que a su vez se convierten en un plan, están destinados a hacerse realidad.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia, quienes estuvieron conmigo apoyándome a lo largo de toda mi carrera. En especial a mi mamá, quien siempre se ha encargado de simplificar mi vida, cuidar de mi alimentación y salud durante todo este proceso denominado vida universitaria. También, quiero agradecer a mi hermana Olga quien desde que tengo uso de razón siempre ha sido mi confidente y un apoyo fundamental. Así como también, a mi Papá quien me entregó lecciones de vida a través de relatos de sus experiencias personales.

A Don Benó, quien me ha apoyado y ayudado durante los últimos 10 años. A mi amigo Mauro, quien me ha apoyado en todo este proceso denominado memoria, ya sea escuchando los problemas que surgieron, y como apoyo de revisión de redacción.

Agradezco la ayuda del Prof. Rodrigo Estay, quien siempre estuvo disponible para aclarar mis dudas en mi proceso de memoria. Al Prof. Víctor Encina, quien me orientó durante toda la realización de esta memoria, gracias por siempre estar disponible para mis consultas y por las largas conversaciones acerca de minería y de la vida misma.

Agradezco a la empresa BHP, por darme la oportunidad de realizar con ellos mi trabajo de titulación. En específico, a todos los miembros que conforman la SI de Geotecnia e Hidrogeología de Pampa Norte. De forma especial, a Marcelo, Yanin, Scarlett, Jorge, Wladimir y Nicolle, quienes me guiaron de forma técnica en mi memoria, así como también a Juan José quien siempre estuvo disponible para guiarme en mi proceso, y responder a mis consultas de manera amable y rápida.

Finalmente, quiero darles las gracias a todas aquellas personas que me ayudaron en algún momento de mi vida universitaria.

Resumen

Debido al extenso historial de eventos catastróficos internacionales de depósitos de relaves que han afectado la seguridad de las personas y el medio ambiente. Es que en agosto de 2020, fue lanzado el Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera (GISTM, según sus siglas en inglés). El cual, busca convertirse en el primer estándar mundial de su tipo que pueda aplicarse a las instalaciones existentes y futuras de relaves, independientemente de su ubicación y depositación, para evitar daños a las personas y el medio ambiente. Está formado por 15 principios y 77 requerimientos, los cuales abordan los siguientes temas: comunidades afectadas, conocimiento básico integrado, diseño, construcción, operación y monitoreo de instalaciones de relaves, gestión y gobernanza, respuesta de emergencia y recuperación a largo plazo, y divulgación pública y acceso a la información. En la actualidad, varios países y empresas mineras están incorporando este estándar, dentro de ellas se encuentra Minera Spence, la cual pertenece a BHP.

El presente trabajo tiene por objetivo el establecer un sistema de gestión administrativa para el tranque de relaves de Minera Spence que permita dar cumplimiento a lo estipulado en el requerimiento 2.2. GISTM. Para lo cual, se recopilaron y analizaron las guías, estándares y boletines de libre acceso publicados por el ICM, ANCOLD, MAC, ICOLD Y EGBC, así como también lo estipulado en la normativa chilena vigente de gestión de depósitos de relaves. En base a dicha recopilación, se obtuvo una metodología de cumplimiento de requerimientos para caracterizar tanto para el sitio de emplazamiento del depósito como del relave mismo. La cual, se transformó en dos planillas de verificación de cumplimiento, ambas permiten verificar el cumplimiento de los requerimientos propuestos para caracterizar, además de verificar que los valores y/o información de cada requerimiento se almacene en plataformas digitales de fácil acceso. Así como también, permiten corroborar que los requerimientos se obtengan en un período igual o menor que 5 años, y que los instrumentos, métodos y tecnologías utilizadas para su obtención sean las últimas publicadas y disponibles del mercado.

Al aplicar esta metodología a las caracterizaciones que en la actualidad se realizan en el tranque de relaves de Minera Spence, se observó que el cumplimiento de la caracterización de los requerimientos propuestos para el sitio de emplazamiento se cumple casi su totalidad. Mientras que, los propuestos para la caracterización del relave su cumplimiento total es bajo. Lo cual puede tener relación con la corta vida operativa del depósito (menor a 2 años).

Finalmente, se logra concluir que la metodología propuesta permite dar cumplimiento a lo estipulado en el requerimiento 2.2 del GISTM, y a su vez con lo estipulado en la normativa chilena vigente de gestión de relaves.

Palabras Claves: Tranque de relaves, Minera Spence, Caracterización, GISTM.

Glosario

AMSA	: Antofagasta Minerals.
ANCOLD	: Australian National Committee on Large Dams.
DIA	: Declaración de Impacto Ambiental.
D.S	: Decreto Supremo.
DSI	: Inspección de Seguridad de Depósitos.
DSR	: Revisión de Seguridad de Depósitos.
EGBC	: Ingenieros y Geocientíficos de la Columbia Británica.
EIA	: Estudio de Impacto Ambiental.
EoR	: Ingeniero de registro.
ICMM	: The International Council on Mining and Metals.
ICOLD	: International Commission on Large Dams.
ITRB	: Comisión Independiente de Revisión de Relaves.
MAC	: The Mining Association of Canada.
PAS	: Permiso Ambiental Sectorial.
RTFE	: Ingeniero responsable de las instalaciones de relaves.
SEA	: Servicio de Evaluación Ambiental.
SEIA	: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.
SERNAGEOMIN	: Servicio Nacional de Geología y Minería.
TSF	: Tailings Storage Facility.
TSM	: Towards Sustainable Mining.

Tabla de contenido

Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Glosario	v
1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo General	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
1.2 Alcances	2
2. Antecedentes	3
2.1 Minera Spence.....	3
2.2 Planta Concentradora	4
2.3 Tranque de relaves de Spence	4
3. Marco Teórico	13
3.1 Relave.....	13
3.2 GISTM	17
3.3 Normativas Nacionales	20
3.4 Asociaciones Internacionales	29
3.4.1 ICMM	29
3.4.2 ANCOLD	31
3.4.3 MAC	35
3.4.4 ICOLD	37
3.4.5 EGBC	41
4. Metodología de gestión de control para el cumplimiento del requerimiento 2.2 del GISTM.....	45
4.1. Caracterización del sitio de emplazamiento.....	46
4.2. Caracterización del relave	54
5. Cumplimiento corporativo del requerimiento 2.2 del GISTM	58
6. Aplicación de la metodología.....	59
6.1 Caracterización del sitio de emplazamiento.....	59
6.2 Caracterización del relave	69
7. Conclusión y recomendaciones	73
Referencias	75

Anexos.....	79
Anexo A: Diagrama de flujo del Depósito de relaves de Spence.	79
Anexo B: Aspectos monitoreados a través del formulario E-700.....	80
Anexo C: Tabla de contenido de un informe de diseño de tranque de relaves en Australia.	80

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Criterios de Diseño del Depósito de Relaves.	6
Tabla 2.2: Características de diseño del Muro Principal.	7
Tabla 2.3: Características Principales de los muros de partida de los muros de arena.	8
Tabla 2.4: Características principales de los muros de arena.	8
Tabla 3.1: Listado de equipos de determinación de fase y técnicas de análisis para la predicción de drenaje minero.	26
Tabla 3.2: Listado de test estáticos y cinéticos de laboratorio para la predicción de drenaje minero.	27
Tabla 3.3: Listado de test cinéticos de campo para la predicción de drenaje minero.	28
Tabla 4.1: Planilla de cumplimiento de la metodología propuesta para la caracterización del sitio de emplazamiento del tranque de relaves de Minera Spence.	49
Tabla 4.2: Planilla de cumplimiento de la metodología propuesta para la caracterización del relave depositado en Minera Spence.	56
Tabla 6.1: Planilla de cumplimiento de los requerimientos de la metodología propuesta para la caracterización del suelo de fundación del tranque de relaves de Minera Spence.	59
Tabla 6.2: Planilla de cumplimiento de los requerimientos de la metodología propuesta para la caracterización del depósito de relaves de Minera Spence.	70

Índice de Figuras

Figura 2.1: Vista planta de las Instalaciones de Minera Spence.	4
Figura 2.2: Ubicación del tranque de relaves.	5
Figura 2.3: Vista Planta del diseño del depósito de relaves.	6
Figura 2.4: Vista Perfil del Muro Principal.	7
Figura 2.5: Vista Perfil de Muro de Arena.	9
Figura 2.6: Tranque de relaves de Spence hasta el primer trimestre de 2022.	12
Figura 2.7: Muro principal, dique y laguna Operacional del tranque de relaves.	12
Figura 2.8: Muros Noreste y Noroeste, y celda 11 del Tranque de relaves de Minera Spence.....	13
Figura 3.1: Esquema de métodos constructivos de depósitos de relaves. a) Método Eje Central o Mixto b) Método Aguas Abajo y c) Método Aguas Arriba.....	15
Figura 3.2: Relave Espesado.	16
Figura 3.3: Relave Filtrado.....	16
Figura 3.4: Relave Filtrado.....	17
Figura 3.5: Temas principales que conforman el GISTM.	18
Figura 3.6: Exigencias normativas para un proyecto de depósitos de relaves en Chile.	21
Figura 3.7: Actividades típicas de caracterización del sitio de emplazamiento de un depósito de relaves en la etapa de diseño.	42

1. Introducción

Uno de los residuos que se generan en el proceso de recuperación de metales y minerales valiosos en la industria minera es el relave. El aumento en la demanda de ciertos minerales, como por ejemplo el cobre, ha ocasionado un aumento en la producción de estos residuos. Lo cual, genera una preocupación en la sociedad, ya que, en el mundo han ocurrido eventos catastróficos causantes de muertes y daños ambientales relacionados con el manejo de relaves. Un claro ejemplo de ello ocurrió en Chile el 28 de marzo de 1965, un terremoto de magnitud 7,3 provocó el colapso del depósito de relaves “El Soldado”, originando un derrame de 1,9 millones de metros cúbicos, que sepultó a la comunidad minera “El Cobre” y causó la muerte de alrededor de 200 personas (Monge E., Rosenberg V., Vives E., & Yoma Y., 1965).

Este hecho marcó significativamente a la minería chilena, lo que se tradujo en la dictación en 1970 del Decreto Supremo N°86/70 del Ministerio de Minería, sobre construcción y operación de los depósitos de relaves (Ministerio de Minería, 2019), cuyo objetivo principal es evitar que este tipo de eventos catastróficos formen parte del historial nacional, mediante el control de todos y cada uno de los factores que pueden afectar la estabilidad de los depósitos de relaves.

Desde esa fecha, se han creado actualizados y/o agregado nuevas normas e iniciativas como el “Programa Tranque” desarrollado por la Fundación Chile, el cual está enfocado en el monitoreo de los muros de los depósitos de relaves (Riveros, 2021).

En el ámbito internacional, uno de los eventos más recientes es el ocurrido en Brasil el 25 de enero de 2019, en el que se produjo una rotura en el depósito de relaves de Córrego do Feijão, ocasionando un alud de relave que arrastró todo tipo de material de las laderas, causando la sepultación de viviendas rurales, dejando alrededor de 115 fallecidos y 248 desaparecidos. La causa de la rotura fue una falla estructural del muro de contención (BBC News Mundo, 2019).

Los eventos catastróficos en depósitos de relaves dejan en evidencia, que si no se gestionan de manera responsable son un riesgo para la salud y la seguridad de las personas, el medioambiente, infraestructura y para las propias empresas mineras. Es por ello, que el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y Principios para la Inversión Responsable (PRI), realizaron una revisión de la experiencia de cada país y empresa que poseen este tipo de residuos, con el fin de normar la operación a lo largo de toda la vida útil del depósito, considerando “cero daños” en las personas y el medioambiente, y tolerancia cero para fatalidades humanas.

De allí nace el Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera, o GISTM según sus siglas en inglés. Este estándar busca fomentar la realización de muestreos y ensayos

de manera regular a los depósitos de relaves, para mantener un control activo de las características de estos, y así poder predecir fallas de manera temprana (International Council on Mining & Metals; UNO environment programme; Principles for Responsible Investment, 2020). En el requerimiento 2.2 de este estándar, se detalla las características que deben formar parte de las caracterizaciones del sitio de emplazamiento del depósito como del relave mismo, este requerimiento estipula lo siguiente:

“Preparar, documentar y actualizar una caracterización detallada del sitio de emplazamiento de la(s) instalación(es) de relaves que incluya su clima, geomorfología, geología, geoquímica, hidrología e hidrogeología (calidad y flujos de aguas superficiales y subterráneas), geotécnica y sismicidad. Las propiedades físicas y químicas de los relaves se deberán caracterizar y actualizar de manera regular con el fin de considerar la variabilidad en las propiedades del mineral y su procesamiento”.

El presente trabajo de título fue solicitado para Minera Spence, por el área de Geotecnia e Hidrología de Pampa Norte, perteneciente a la empresa BHP, con el propósito de desarrollar una metodología de gestión y control interno para el cumplimiento del requerimiento 2.2 estipulado por el GISTM.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de gestión administrativa para dar cumplimiento al requerimiento 2.2 del Estándar GISTM en el tranque de relaves de Minera Spence.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Generar una base de datos de lo recomendado en los boletines, guías y normas internacionales para hacer una adecuada caracterización de un depósito de relaves.
- Determinar los requerimientos en el ámbito de la caracterización de relaves derivados de las normas regulatorias chilenas.
- Elaborar un catastro de registros de las caracterizaciones realizadas al tranque de relaves de Minera Spence.
- Determinar las brechas de registros de datos de Minera Spence respecto de los requerimientos normativos.

1.2 Alcances

Las propuestas de este trabajo se enfocan en que las caracterizaciones realizadas y por realizar tanto en el sitio de emplazamiento del tranque de relaves de Minera Spence como

del relave mismo, solo se refieran al cumplimiento de lo estipulado en el requerimiento 2.2 del GISTM, y a lo estipulado en la normativa chilena vigente sobre la gestión de depósito de relaves.

Las guías, boletines y estándares utilizados para la elaboración de la metodología a proponer, corresponden solo a los documentos de libre acceso publicados sobre la gestión y monitoreo de depósito de relaves del ICMM, ANCOLD, MAC, ICOLD y EGBC.

En este trabajo, no se utiliza la información de documentos de pago publicados por cada asociación.

2. Antecedentes

2.1 Minera Spence

Minera Spence, explota una mina de cobre a cielo abierto, que inició sus operaciones en diciembre de 2006, correspondiendo a un yacimiento de pórfido de cobre con cuatro zonas mineralizadas: zona de óxidos, zona de enriquecimiento de supérgenos, zona mixta y zona de hipógenos. La mina fue diseñada para extraer 50.000 [t/d] de uno u otro mineral, óxido o sulfuro en diferentes fracciones al día.

Esta operación se ubica sobre los 1750 [m.s.n.m] en la comuna de Sierra Gorda en la Provincia de Antofagasta, Región de Antofagasta. A 50 [km] al Suroeste de la ciudad de Calama y 150 [km] al noreste de la ciudad de Antofagasta (BHP, 2021).

Desde 2021, se dio inicio al proyecto SGO (Spence Growth Option), el cual consta de ampliar la vida útil de la mina en más de 50 años, mediante el procesamiento de sulfuros primarios de cobre a través de una planta concentradora. En la **Figura 2.1**, se puede observar la distribución espacial de las áreas productivas de Minera Spence.



Figura 2.1: Vista planta de las Instalaciones de Minera Spence.
Fuente: Portal Geomin, Servicio Nacional de Geología y Minería.

2.1 Planta Concentradora

2.3 Tranque de relaves de Spence

Como su nombre lo indica la forma en que se depositan los relaves en esta minera es mediante el método de tranque con crecimiento del muro aguas abajo. Este depósito en el año 2021 inició su etapa de operatividad, correspondiente a la Fase 1 que tiene una duración de 50 años, al término de esta se inicia la Fase 2 que tiene una duración estimada de operatividad de 15 años. La ubicación del tranque se puede observar en la **Figura 2.2**, cabe mencionar que la zona de emplazamiento del depósito está situado al Oeste del Rajo y próximo a la Planta Concentradora.

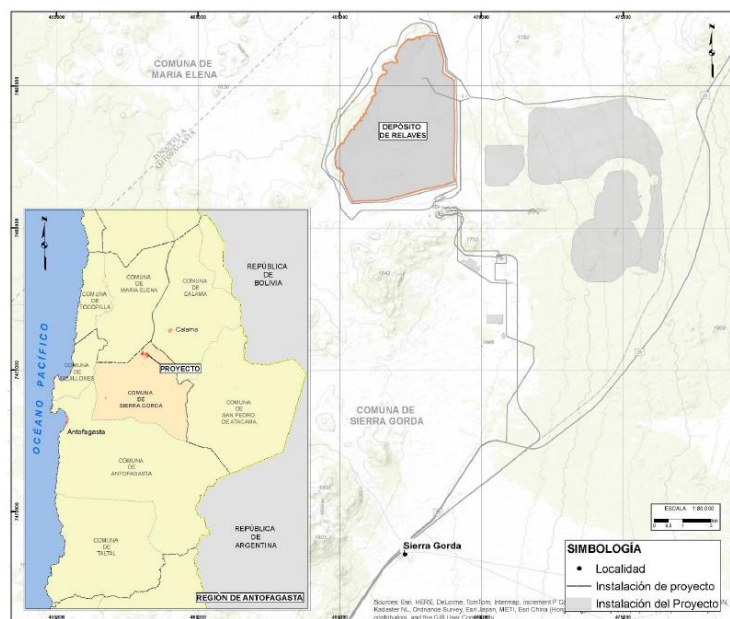


Figura 2.2: Ubicación del tranque de relaves.

Fuente: Minera Spence.

Los relaves provenientes del proceso de concentración son confinados en el tranque, mediante una serie de muros de arena perimetrales y de un muro principal construido con material proveniente de excavaciones cercanas (ver **Figura 2.3**). Además, cuenta con un dique de protección para confinar la laguna operacional desde el interior de la cubeta en el sector Oeste. Actualmente, existen 2 muros de arena, la cual es obtenida del ingreso del relave al hidrociclón, ambos muros fueron construidos con una base de material de empréstito.

La distribución de los relaves consiste en puntos de descarga por celdas radiales situadas a lo largo de toda la longitud de los muros, siendo utilizadas en diferentes períodos de tiempo según crecimiento. La capacidad máxima de diseño del depósito es de aproximadamente 681,3 [Mt] de relaves, ocupando una superficie aproximada de 18 [km²]. Los principales criterios de diseño considerados para el depósito de relaves se indican en la **Tabla 2.1**.

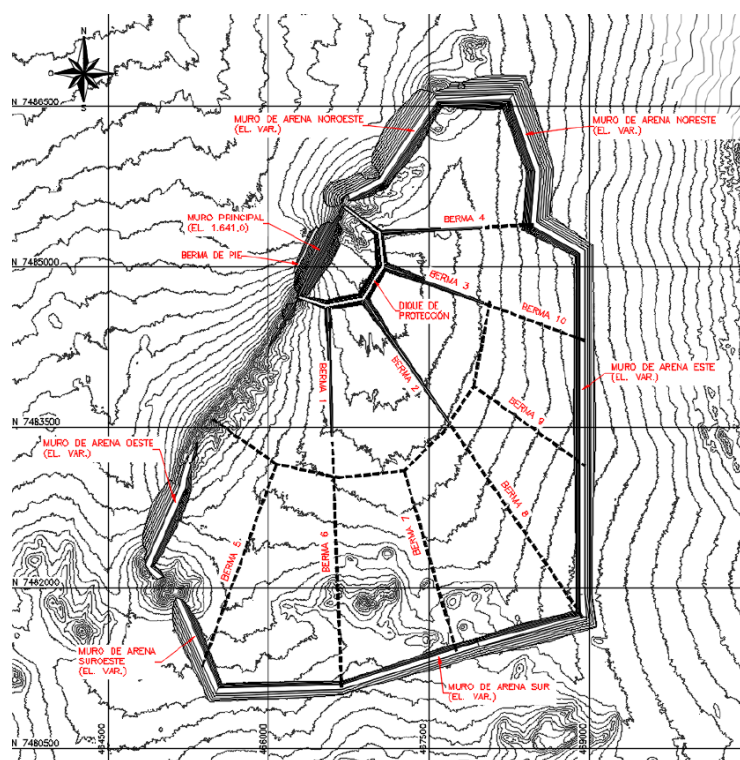


Figura 2.3: Vista Planta del diseño del depósito de relaves.

Fuente: Minera Spence.

Tabla 2.1: Criterios de Diseño del Depósito de Relaves.

Descripción	Unidades	Valor Aproximado
Capacidad del diseño	Mt	681,3
Contenido de sólidos en peso del relave integral (Cp)	%	52
Contenido de sólidos en peso del relave y lamas en funcionamiento de estación ciclón fijo (Cp)	%	48 – 54
Pendiente de depositación	%	0,3
Densidad del relave	t/m ³	1,35

Fuente: Minera Spence.

Como se observa en la **Figura 2.3**, el muro principal se encuentra ubicado hacia el sector Norte del lado Oeste del depósito de relaves, y está constituido completamente por material de empréstito y opera en contacto con la laguna operacional. El crecimiento del muro adopta un método mixto, el cual se compone del método de construcción aguas abajo y el método “capa por capa”, en función de las fuentes de empréstito y de las tasas de construcción requeridas. Las principales características del muro principal son presentadas en la **Figura 2.4** y **Tabla 2.2**.

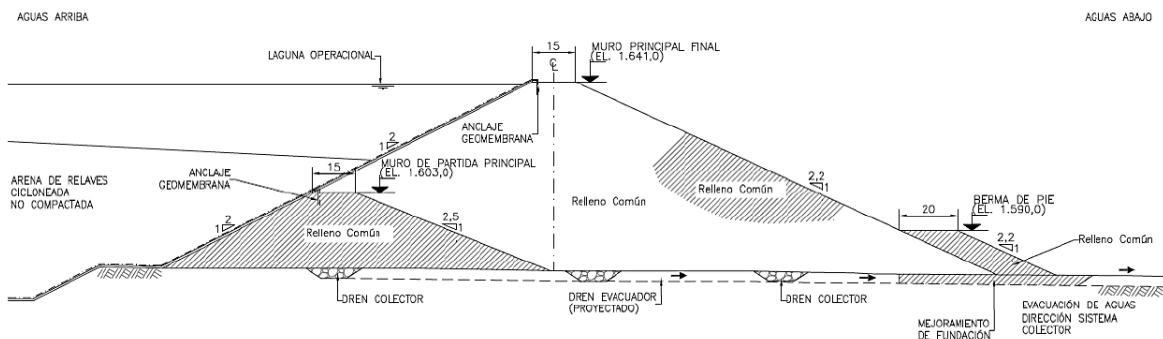


Figura 2.4: Vista Perfil del Muro Principal.

Fuente: Minera Spence.

Tabla 2.2: Características de diseño del Muro Principal.

Características	Unidades	Muro de Partida	Muro Principal (Final)
Material	-	Empréstito	Empréstito
Altura Máxima (eje)	m	26	65
Elevación de coronamiento	msnm	1.603	1.641
Longitud de coronamiento	m	510	1.000
Ancho de coronamiento	m	15	15
Talud aguas arriba	H:V	2:1	2:1
Talud aguas abajo	H:V	2,5:1	2,2:1

Fuente: Minera Spence.

Para prevenir posibles filtraciones desde la laguna operacional hacia el interior del cuerpo del muro, el talud aguas arriba del muro cuenta con una impermeabilización mediante la utilización de una geomembrana de HDPE de 1,5 [mm] de espesor más un geotextil de gramaje 200 [g/m²] que brinda una protección a la geomembrana, en aproximadamente 100.000 [m²] de superficie. Sobre la geomembrana existe un sistema de bicapa compuesto de material granular, el cual en conjunto con un sistema de bombeo permite la extracción de agua desde la laguna operacional. De manera similar, para prevenir infiltraciones en el muro principal (constituido de material permeable) cuenta con un sistema de drenaje en su base que se compone de drenes colectores y un dren evacuador, este último permite dirigir las aguas a la piscina principal de recolección de aguas.

La depositación de arena a los muros, se hace mediante capas inclinadas paralelas a la pendiente aguas abajo del muro, descargadas desde el coronamiento de este. Los muros de partida se construyeron con empréstito locales provenientes de depósitos aluviales/coluviales ubicados dentro de la cubeta del depósito. Las dimensiones y características principales de estos muros se observan en la **Tabla 2.3** y **Tabla 2.4**.

Tabla 2.3: Características Principales de los muros de partida de los muros de arena.

Características	Unidades	Muros de Partida					
		Noreste	Noroeste	Suroeste	Este	Sur	Oeste
Año de requerimiento	año	1	1	5	5	6	3
Material	-	Empréstito (Material aluvial/Coluvial)					
Altura Máxima (eje)	m	6	11	7	5	7	5
Elevación de coronamiento	msnm	1.605	1.605	1.625	1.620	1.626	1.615
Longitud de coronamiento	m	851	442	532	620	976	373
Ancho de coronamiento	m	20					
Talud aguas arriba	H:V	2:1					
Talud aguas abajo	H:V						

Fuente: Minera Spence.

Tabla 2.4: Características principales de los muros de arena.

Características	Unidades	Muros de Arena					
		Noreste	Noroeste	Suroeste	Este	Sur	Oeste
Material	-	Arena de relaves					
Altura Máxima (eje)	m	45	52	30	28	30	39
Elevación de coronamiento	msnm	1.645	1.642	1.649	1.645	1.650	1.648
Longitud	m	2.147	1.306	2.460	3.700	2.176	1.029
Ancho de coronamiento	m	50					
Talud aguas arriba	H:V	2:1					
Talud aguas abajo	H:V	4:1					

Fuente: Minera Spence.

El talud aguas arriba de los muros de partida están impermeabilizados con una geomembrana de HDPE de 1,5 [mm] de espesor más un geotextil de gramaje 200 [g/m²] para dar protección a la geomembrana. El muro cuenta con un revestimiento de geomembrana en toda la base (incluidos los drenes), con el fin de reducir las infiltraciones hacia el suelo de fundación desde los flujos provenientes de la depositación de arena para la construcción de cada muro. Además, los muros de arena poseen en su base un sistema de drenaje para asegurar que el nivel freático se mantenga bajo al interior del muro (ver **Figura 2.5**). El agua transportada por la arena es recogida por los drenes basales y llevada hacia las cámaras o piscinas colectoras de drenaje ubicadas aguas abajo de los distintos muros. Luego es bombeada hacia alguna de las estaciones de ciclones o directamente a la Planta de Proceso. Cabe mencionar que el sistema de drenaje se expande en conjunto con el crecimiento del muro.

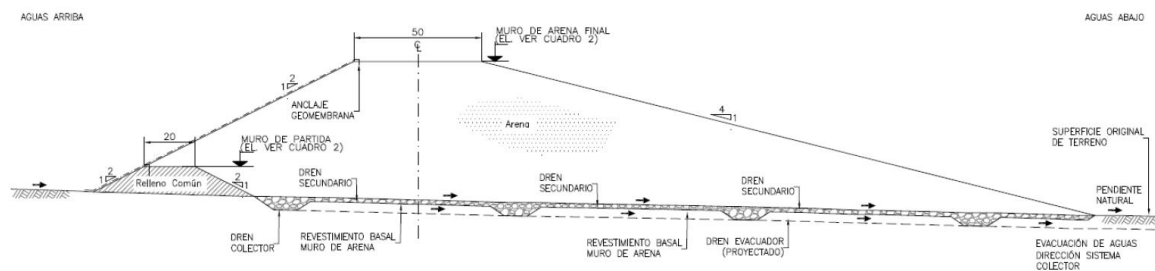


Figura 2.5: Vista Perfil de Muro de Arena.

Fuente: Minera Spence.

Por otro lado, toda el área donde se encuentra emplazada la laguna operacional cuenta con un revestimiento basal, para reducir las filtraciones desde ésta hacia el suelo de fundación. El revestimiento consiste en una geomembrana de HDPE de 1,5 [mm] de espesor que cubre una superficie aproximada de 1 [km²].

El dique de protección se encuentra emplazado hacia el Oeste del depósito a unos 500 [m] aguas arriba del muro principal. Su principal función es mantener la laguna operacional en una posición fija durante la operación, confinándola contra el muro principal. Se encuentra conectado con 4 bermas divisorias que llegan hacia el área Oeste del depósito, quedando subdividido en 5 secciones. Aguas arriba del dique se apoyan los relaves depositados en la cubeta (principalmente lamas). Desde su coronamiento se deposita de forma hidráulica arena de relave proveniente del hidrociclón, con el fin de dar soporte por el lado aguas abajo del dique. El material utilizado para la construcción del dique es material estéril proveniente de la mina (Material de enrocado).

A medida que los relaves son depositados en las celdas de operación, el dique de protección considera un sistema de recuperación del agua de contacto liberada por los relaves a modo de posibilitar su transferencia hacia la laguna operacional. Este sistema controla el crecimiento de los relaves aguas arriba del dique de protección, interceptando la superficie libre de la laguna auxiliar formada temporalmente en la celda de depositación activa y descargando aguas abajo sobre la elevación de las arenas depositadas hidráulicamente en la cubeta de la laguna operacional. La recuperación del agua se logra gracias a un sistema de tuberías ubicadas al interior del dique, estas permiten el paso del agua desde los relaves hasta la laguna operacional, este sistema se bloquea cuando la medida del nivel del relave alcanza el tope permitido.

Para el caso del manejo de aguas de no contacto se considera la utilización de las siguientes obras de desvío y acumulación de los caudales afluentes:

- El canal de contorno Este-Oeste (E-O), intercepta las aguas provenientes de las quebradas ubicadas en el sector Norte del depósito, descargándolas aguas abajo de las instalaciones.
- La escorrentía proveniente de las áreas ubicadas entre el canal y los muros del depósito, son desviadas por una berma de seguridad, ubicada en el costado exterior del camino de servicio perimetral, correspondiente a la plataforma donde se ubican las tuberías de recolección de drenaje de los muros de arena, siendo contenida en puntos bajos para su evaporación, de modo que dichos flujos no entren en contacto con los muros de arena.
- El área de acumulación de aguas de no contacto, tiene como función la contención de la escorrentía proveniente desde el sector Sur del depósito evitando que entre en contacto con el muro de arena.

Por otro lado, las bermas tienen el objetivo de sectorizar la totalidad del tranque en celdas de depositación del relave. Por diseño se contempla un total de 11 bermas divisorias, compuestas por 10 bermas radiales y una berma intermedia. Además, están construidas mediante el método de eje central (configuración árbol de navidad), con peraltes cada 3 [m], y el material utilizado corresponde a empréstito, relave seco depositado en la cubeta y arena de relave. Se estableció que los primeros 150 [m] de las bermas divisorias iniciales y adyacentes al dique, fueran construidas con empréstito y los peraltes con arena de relave, considerando un coronamiento de 15 [m] y taludes de 1,5H : 1V. Para el caso de las bermas divisorias restantes, estas se construyeron con empréstito y son rellenas con relave seco de la cubeta, con un coronamiento de 6 [m].

El depósito cuenta con un sistema de clasificación y distribución de relaves que está conformado por los siguientes elementos y procesos:

- Cajón de descarga de espesadores (sistema de transporte de relaves).
- Cajón de distribución de relaves Este y Suroeste.
- Cajón de dilución de relaves Este y Suroeste (dilución desde un Cp de 52% a un Cp de 40%).
- Estación de ciclones Este y Suroeste: las estaciones de ciclones Este y Suroeste están compuestas por 15 ciclones operando y 5 ciclones en reserva, donde se separan los relaves en una proporción de 0,3:0,7 de arenas y lamas, respectivamente. Las arenas con un Cp nominal de 70% son impulsadas a los muros, por otra parte, en el sistema Este y Suroeste, las lamas se mezclarán con los relaves integrales provenientes de los cajones de distribución de relaves, para ser distribuidas en la cubeta del depósito a lo largo de los puntos de descarga.
- Cajón de lamas Este y Suroeste (sistema de distribución de relaves).
- Cajón de arenas Este y Suroeste (sistema de distribución de arenas).
- Sistemas de descarga de emergencia.
- Tuberías de Transporte de Relaves.

- Tuberías de Distribución de Relaves Este y Suroeste.
- Tuberías de Distribución de Arena Este y Suroeste.

La interacción de los procesos y elementos mencionados anteriormente, se pueden apreciar en el esquema del **Anexo A**. Finalmente, para mantener un monitoreo sísmico, control del nivel freático en los muros, el control de filtraciones a través de la fundación y la medición de los desplazamientos, se utilizan las siguientes instrumentaciones:

- Sismógrafos para monitorear y medir aceleraciones del suelo en el sitio en caso de actividad sísmica. Un sismógrafo permanente se ubica en el lado Oeste del depósito, emplazado sobre la roca. La otra unidad consiste en una estación portátil que se ubica en el muro principal.
- Hitos de control topográfico instalados en el coronamiento de los muros de partida y de arena, para medir deformaciones del coronamiento del muro en respuesta a los asentamientos por consolidación de la arena del muro y de las cargas aplicadas desde los relaves.
- Piezómetros instalados dentro del cuerpo del muro y en la fundación. Estos piezómetros monitorean los niveles de agua tanto en los materiales de fundación como en el relleno del muro de arena.
- Piezómetros de cuerda vibrante, que se encuentran al interior de sondajes en el suelo de fundación y se cementan al pozo.
- Celdas de asentamiento en la base del muro, con la finalidad de controlar la deformación de los muros en el tiempo debido a los procesos de consolidación.
- Dispositivos “Shape Accelerometer Array”, para controlar de forma remota y en tiempo real, las deformaciones que se pueden presentar en los muros. Estos sistemas permiten detectar las deformaciones debidas a un sismo al activarse cuando hay aceleraciones del terreno.
- Rodeando al depósito se encuentran piezómetros de Casagrande y pozos de monitoreo, los cuales miden la presencia de nivel freático en los materiales de fundación. El pozo de monitoreo determina el nivel freático general al rellenarse el pozo en su totalidad con un empaque de grava, mientras que la punta del sensor del piezómetro Casagrande está aislado con un sello de cemento-bentonita para impedir la migración vertical del agua y así poder medir la presión de poros y de agua. En este tipo de instalaciones se puede llevar a cabo monitoreo de calidad de agua.
- Red de pozos enfocados a verificar que no se produzcan alteraciones en la calidad y cantidad de las aguas en la zona del proyecto.

A continuación, se puede observar algunas imágenes de las infraestructuras que componen el tranque de relaves de Minera Spence.



Figura 2.6: Tranque de relaves de Spence hasta el primer trimestre de 2022.
Fuente: Minera Spence.



Figura 2.7: Muro principal, dique y laguna Operacional del tranque de relaves.
Fuente: Conpax.



Figura 2.8: Muros Noreste y Noroeste, y celda 11 del Tranque de relaves de Minera Spence.

Fuente: Minera Spence.

3. Marco Teórico

3.1 Relave

En el decreto Supremo N°248 del año 2007, define a los relaves de la siguiente manera: “suspensión de sólidos en líquidos, formando una pulpa, que se generan y desechan en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina. El vocablo se aplicará, también, a la fracción sólida de la pulpa que se ha descrito precedentemente”. (Ministerio de Minería , 2019)

En otras palabras, el relave es una mezcla de material sólido molido, agua y reactivos utilizados en el proceso de flotación. Esta mezcla denominada pulpa, es transportada mediante cañerías o canaletas a su depositación final o a las plantas de recuperación de agua, para finalmente quedar como un depósito estratificado de materiales finos.

Actualmente, existen diferentes formas de depositar los relaves, las cuales son:

- **Embalse de relaves:** Este tipo de depositación se caracteriza por utilizar empréstito (rocas y arenas aledañas), como material de construcción del muro. Tanto el coronamiento como el talud interno se encuentran impermeabilizados con material natural y/o geomembranas. También, se denomina embalse de relave, a aquellos depósitos que se ubican en una depresión geográfica, y no necesitan de un muro de contención. Desde el punto de vista sísmico, los embalses de relaves son más resistentes que los tranques de relaves (SERNAGEOMIN, 2018).

- **Tranque de relaves:** Depósito que cuenta con un muro de contención compuesto por la fracción gruesa del relave (Arenas), mientras la lama se almacena en la cubeta. Existen 3 alternativas de construcción del muro, estas son:

- Crecimiento del muro “aguas arriba”: SERNAGEOMIN lo define de la siguiente manera: “Consiste en un muro inicial construido con material de empréstito compactado sobre el cual se inicia la deposición de los relaves, utilizando clasificadores o hidrociclones; donde la fracción más gruesa se descarga por el flujo inferior del hidrociclón y se deposita junto al muro inicial, mientras que la fracción más fina, que sale por el flujo superior del hidrociclón se deposita hacia el centro del tranque en un punto más alejado, de tal modo que se va formando una especie de playa o laguna de sedimentación, la que una vez libre de partículas en suspensión es evacuada mediante un sistema de estructura de descarga. Una vez que el depósito se encuentre próximo a llenarse, se procede a levantar el muro, desplazando los hidrociclones a una mayor elevación en la dirección de aguas arriba y comenzando así, una nueva etapa de descarga de relaves. Si bien este método requiere un menor volumen de material arenoso, es el tipo de muro menos resistente frente a los sismos, por lo que en Chile su construcción está totalmente prohibida” (SERNAGEOMIN, 2018). En la **Figura 3.1 - (c)**, se observa un esquema representativo de este método.
- Crecimiento del muro “Eje Central o Mixto”: SERNAGEOMIN lo describe de la siguiente manera: “Se inicia con un muro de partida de material empréstito compactado, sobre el cual se deposita la parte gruesa hacia el lado de aguas abajo y la parte fina o lamas hacia el lado de aguas arriba. Una vez completado el vaciado de material, se eleva la línea de alimentación de la parte gruesa y fina, siguiendo el mismo plano vertical inicial de la berma de coronamiento del muro de partida. Lo que permite lograr un muro de arenas donde el eje se mantiene en el mismo plano vertical, el talud de aguas arriba relativamente vertical, y el talud aguas abajo puede tener la inclinación que se considere adecuada. Este método requiere disponer un volumen suficiente de arenas que permitan lograr muros estables sísmicamente” (SERNAGEOMIN, 2018). En la **Figura 3.1 - (b)**, se observa un esquema representativo de este método.
- Crecimiento del muro “aguas abajo”: SERNAGEOMIN lo describe de la siguiente manera: “La construcción se inicia con un muro de partida de material de empréstito compactado, a partir del cual se inicia el levantamiento del muro con la arena del relave, donde la parte gruesa se vacía hacia el lado del talud de aguas abajo y la parte fina se deposita hacia el talud aguas arriba. Cuando el muro se ha peraltado lo suficiente (2 - 4 [m]), se inicia la elevación del muro, desplazando a los hidrociclones a una mayor elevación en dirección aguas abajo, y así, comenzando

una nueva etapa de descarga de relaves. Este método requiere disponer un gran volumen de material arenoso, pero permite lograr una mayor estabilidad sísmica” (SERNAGEOMIN, 2018). En la **Figura 3.1 - (a)**, se observa un esquema representativo de este método.

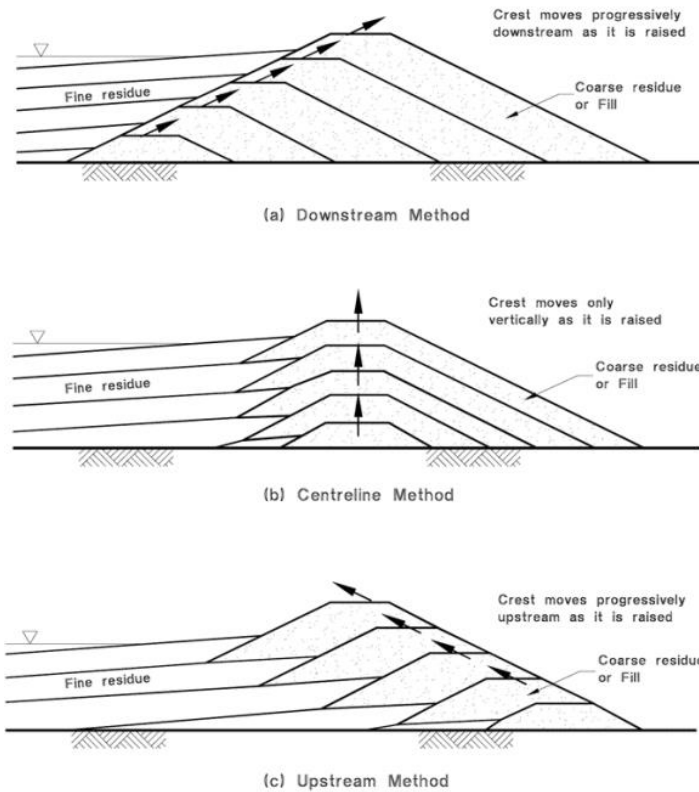


Figura 3.1: Esquema de métodos constructivos de depósitos de relaves. a) Método Eje Central o Mixto b) Método Aguas Abajo y c) Método Aguas Arriba.

Fuente: Department of Minerals and Energy, University of Western Australia.

- **Relaves espesados:** La pulpa de relave, antes de ser depositada pasa por un proceso de sedimentación. En esta etapa, se busca eliminar una parte del agua que contienen. Este tipo de depósito debe ser construido de tal forma que se impida que el relave fluya a otras áreas distintas de las del emplazamiento determinado, y debe contar con un sistema de piscinas de recuperación del agua remanente. A pesar de la extracción de una parte de su contenido de agua, los relaves espesados mantienen aún un alto contenido de agua, el que podría ser recuperado previo a su depositación en el depósito, mediante filtrado parcial o total (Ministerio de Minería , 2019).

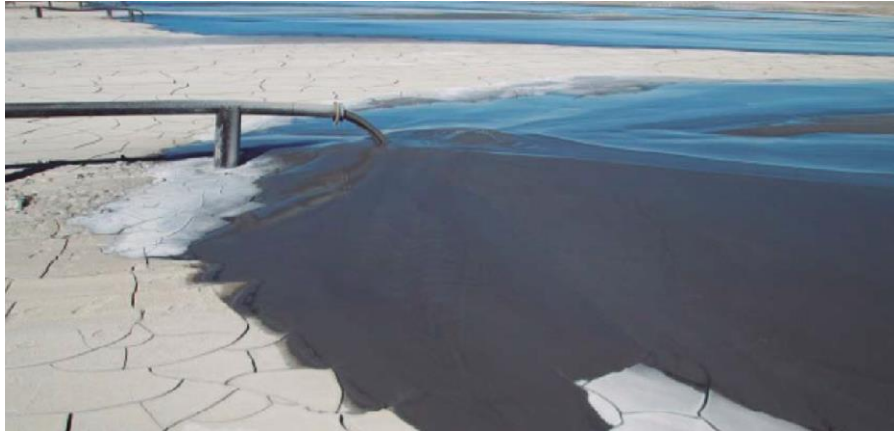


Figura 3.2: Relave Espesado.

Fuente: Minería Chilena.

- **Relaves filtrados:** En este tipo de depósito aumenta la cantidad de agua recuperada de la pulpa de relave, en comparación al relave espesado. El relave es sometido a un proceso de filtración, donde se asegura que la humedad sea menor a un 20% (Ministerio de Minería , 2019).



Figura 3.3: Relave Filtrado.

Fuente: DELFING.

- **Relaves en Pasta:** Este tipo de depósito de relaves corresponde a un material intermedio entre el relave espesado y el relave filtrado, siendo una mezcla de relaves sólidos y 10 - 25% de agua, además contiene partículas finas menores de 20 micrones, es similar a una pulpa de alta densidad. Esta tecnología requiere la construcción de espesadores de mayor altura que lo habitual, 15 [m] a 20 [m], que permitan descargar pulpas de alta densidad (65 a 75% de sólidos) (Ministerio de Minería , 2019).

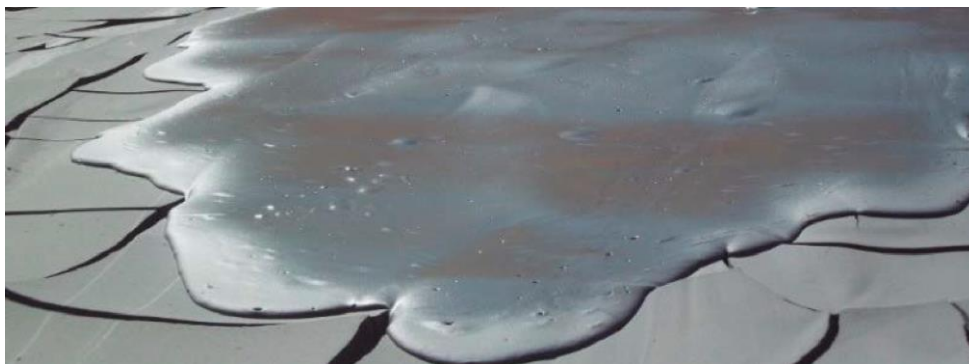


Figura 3.4: Relave Filtrado.

Fuente: DELFING.

3.2 GISTM

Posterior al colapso de las instalaciones del depósito de relaves en Brumadinho (Brasil), se realizó la Revisión Global de Relaves (GTR, por sus siglas en inglés), el cual fue un proceso independiente convocado en marzo de 2019 por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Principios para la Inversión Responsable (PRI) y el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM, por sus siglas en inglés). El objetivo principal de esta reunión era la creación de normas regulatorias a nivel internacional para el manejo de relaves (ONU Programa para el Medio Ambiente, 2020). Como resultado de dicha reunión, el día 05 de agosto de 2020 fue lanzado el Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera (GISTM, según sus siglas en inglés), convirtiéndose en el primer estándar mundial de su tipo que pueda aplicarse a las instalaciones existentes y futuras de relaves, independientemente de su ubicación y método de depositación, para evitar daños a las personas y el medio ambiente.

Este estándar está dirigido a los operadores (entidades que controlan el depósito de relaves), y se aplica a las instalaciones de relaves tanto existentes como futuras. Dejando en claro que las consecuencias extremas para las personas y el medio ambiente por fallas catastróficas en las instalaciones de relaves son inaceptables. Los operadores deben tener tolerancia cero a muertes, y esforzarse por no dañar a las personas ni al medio ambiente desde las primeras fases de la concepción del proyecto. Es por ello, que abarca todo el ciclo de vida de las instalaciones de relaves, desde la selección, diseño y construcción de los sitios de emplazamiento, pasando por la gestión y monitoreo, hasta el cierre y post - cierre. Por lo cual, aumenta significativamente las exigencias para que la industria logre resultados sociales, ambientales y técnicos sólidos, elevando la responsabilidad a los niveles organizacionales más altos y agregando nuevos requisitos para la supervisión independiente. También establece expectativas claras en torno a los requisitos de transparencia y divulgación globales.

El GISTM, está constituido por un total de 15 principios y 77 requisitos, que abarcan seis

temas claves, los cuales se pueden apreciar en la **Figura 3.5**.



Figura 3.5: Temas principales que conforman el GISTM.

Fuente: (International Council on Mining & Metals; UNO environment programme; Principles for Responsible Investment, 2020).

A continuación, se describe los temas principales que conforman el estándar (Internacional Council on Mining & Metals; UNO environment programme; Principles for Responsible Investment, 2020):

- **Comunidades afectadas:** Se centra en las personas afectadas por el proyecto, para respetar los derechos humanos, incluidos los derechos individuales y colectivos de los pueblos indígenas y tribales. Se requiere un proceso de vigilancia de los derechos humanos para identificar y abordar a las personas que corren más riesgo a causa de una instalación de relaves o de su posible colapso. Para demostrar este respeto, las personas afectadas por el proyecto deben tener la oportunidad de participar de forma significativa en las decisiones que les afectan. Los requisitos dentro de esta área están orientados a ser transversales en términos de ser abordados en todas las actividades operativas y permanentes a lo largo de todo el ciclo de vida de la instalación de relaves.
- **Conocimiento básico integrado:** Se establece el requerimiento de que los operadores desarrollen conocimientos sobre el contexto social, ambiental y económico local de una instalación de relaves propuesta o existente y, como parte de esto, que realicen una caracterización detallada del sitio. Además, se solicita que se desarrolle una base de conocimientos multidisciplinar, y que el operador y las partes interesadas la utilicen de forma iterativa para que todas las partes puedan tomar decisiones informadas a lo largo del ciclo de vida de la instalación de relaves. Estas decisiones surgirán en el contexto de

los análisis de alternativas, la elección de las tecnologías y los diseños de las instalaciones, los planes de respuesta a emergencias, y los planes de cierre y post-cierre, entre otros.

- **Diseño, construcción, operación y monitoreo de instalaciones de relaves:** Tiene como objetivo elevar el estándar de rendimiento para el diseño, construcción, explotación, mantenimiento, supervisión y cierre de las instalaciones de residuos. Se pide a los operadores que garanticen la capacidad de mejorar una instalación en una fase posterior hasta una clasificación de mayor impacto. En el caso de las instalaciones existentes, si no es posible mejorarlas, el operador debe reducir las consecuencias de un posible fallo. Reconociendo que las instalaciones de relaves son estructuras dinámicas de ingeniería, esta área requiere el uso continuo de una base de conocimientos actualizada, la consideración de tecnologías de relaves alternativas, el uso de diseños robustos, y procesos de construcción y operación bien gestionados para minimizar el riesgo de una falla. Un sistema de control exhaustivo debe apoyar la plena aplicación del método de observación y debe adoptarse un enfoque basado en el rendimiento para el diseño, construcción y explotación de las instalaciones de relaves.
- **Gestión y gobernanza:** Se centra en la gestión y gobernanza continuas de una instalación de relaves. Establece la designación y asignación de responsabilidades a los roles clave en la gestión de la instalación de relaves, incluyendo un ejecutivo responsable, un ingeniero de registro y un ingeniero responsable de la instalación de relaves. Además, establece normas para sistemas y procesos críticos, como el sistema de gestión de relaves y las revisiones independientes, que son esenciales para mantener la integridad de una instalación de relaves a lo largo de su ciclo de vida. También se incluye la colaboración interfuncional y el desarrollo de una cultura organizativa de aprendizaje que acoge la identificación de problemas y protege a los denunciantes.
- **Respuesta de emergencia y recuperación a largo plazo:** Esta área consiste en la preparación y respuesta de emergencia en caso de falla de una instalación de relaves. Los operadores deben evitar la confianza en las exigencias que se les plantearían en caso de una falla catastrófica. El estándar exige a los operadores que consideren su propia capacidad junto con la de otras partes, y que planifiquen con antelación. Además, pide que trabajen en colaboración con otras personas, en particular con las comunidades, para prepararse para el improbable caso de una falla. También describe las obligaciones fundamentales del operador en la recuperación a largo plazo de las comunidades afectadas en caso de un fallo catastrófico.
- **Divulgación pública y acceso a la información:** Requiere la divulgación de información sobre las instalaciones de relaves para apoyar la responsabilidad pública, al tiempo que protege a los operadores de la necesidad de divulgar información comercial

o financiera confidencial. El estándar exige que los operadores se comprometan con la transparencia y participen en iniciativas globales para crear información estandarizada, independiente, para toda la industria y accesible al público sobre las instalaciones de relaves.

Como se mencionó en el capítulo de objetivos, el presente trabajo busca desarrollar un sistema de gestión administrativa para Minera Spence con el fin de dar cumplimiento a lo estipulado en el Principio 2, específicamente en el requerimiento 2.2, el cual indica lo siguiente (International Council on Mining & Metals; UNO environment programme; Principles for Responsible Investment, 2020):

“Requisito 2.2: Preparar, documentar y actualizar una caracterización detallada del sitio de emplazamiento de la(s) instalación(es) de relaves que incluya su clima, geomorfología, geología, geoquímica, hidrología e hidrogeología (calidad y flujos de aguas superficiales y subterráneas), geotécnica y sismicidad. Las propiedades físicas y químicas de los relaves se deberán caracterizar y actualizar de manera regular con el fin de considerar la variabilidad en las propiedades del mineral y su procesamiento”.

Si bien el requerimiento estipula la realización, documentación y actualización de las características tanto del sitio de emplazamiento como del relave, este no indica los parámetros, estudios o ensayos que se deben realizar para generar una caracterización detallada. Por lo cual, para la elaboración del sistema de gestión de cumplimiento a proponer, se utilizan las recomendaciones entregadas por la normativa nacional y asociaciones internacionales, las cuales se describen en sus respectivos capítulos.

3.3 Normativas Nacionales

Debido a los problemas que surgieron en la estabilidad de depósitos de relaves a nivel nacional e internacional, además de la diversidad de nuevas formas de depositar los relaves y los avances en el diseño, construcción y operación de ellos, causaron que el Ministerio de Minería de Chile promulgara un nuevo decreto que modifica el D.S.86, con el fin de proteger el medio ambiente, la correcta utilización de recursos naturales, salud y seguridad de las personas. Este corresponde al Decreto Supremo N°248 decretado en el año 2007, el cual tiene por objetivo fijar las normas sobre los procedimientos para la aprobación de los proyectos de depósitos de relaves mineros y de los requisitos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves de la gran, mediana y pequeña minería chilena. También, rige a todas las modificaciones que se consideren realizar en proyectos ya aprobados (Ministerio de Minería, 2007).

Cabe mencionar que, en la actualidad, el D.S. 248 entró en un proceso de modificación. Con el fin de actualizar sus normas de acuerdo con los avances en tecnologías y

recomendaciones entregadas a través de guías, estándares o boletines por las asociaciones internacionales. Siendo uno de ellos el GISTM, ya que, el país forma parte de las instituciones creadoras de este estándar, por lo cual la incorporación de sus principios y requerimientos en las leyes y decretos que regulan los depósitos de relaves en el país es imperiosa.

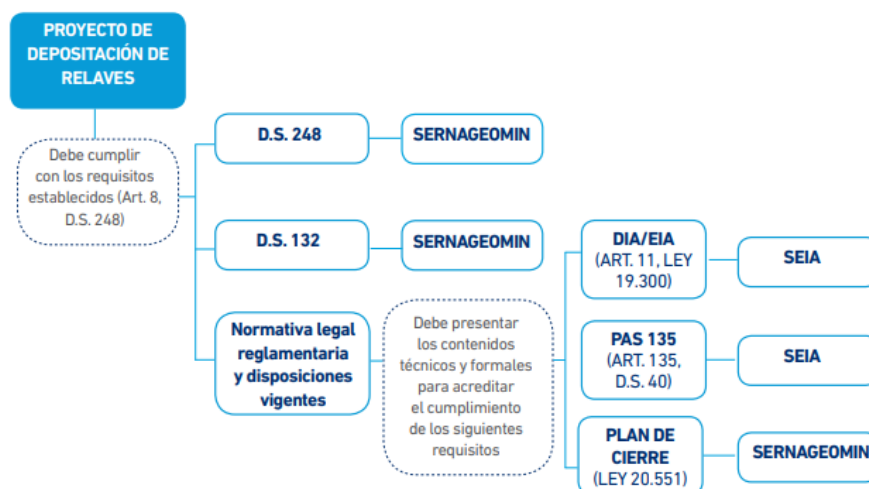


Figura 3.6: Exigencias normativas para un proyecto de depósitos de relaves en Chile.

Fuente: (Programa Tranque, 2018).

Cómo se observa en la **Figura 3.6**, si bien todos los proyectos deben registrarse por el D.S. 248, también deben cumplir los requisitos estipulados por el D.S. 132 (Reglamento de Seguridad Minera), el cual tiene por objetivo el proteger la vida e integridad física de las personas, y de las instalaciones e infraestructuras, asegurando la continuidad del proceso. De forma similar, se debe cumplir con la aprobación del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), ya sea de la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o el Estudio de Impacto Ambiental (EIA), siendo la normativa aplicable a este ítem el D.S. 40 (Reglamento del SEIA) y la Ley 20.417, la cual modifica a la Ley 19.300, donde se especifica si los proyectos de desarrollo minero o de disposición de residuos son clasificables como actividades susceptibles de causar impacto ambiental. Posterior al término de evaluación por parte del SEA, se emite una Resolución de Calificación Ambiental (RCA), donde se establecen las condiciones bajo las cuales se aprueba el proyecto, las que deben ser cumplidas durante todo su ciclo de vida. El ente regulador del cumplimiento de estas condiciones es la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) (Programa Tranque, 2018).

Por otro lado, también se debe contar con el Permiso Ambiental Sectorial Mixto 135 (PAS (Permiso Ambiental Sectorial)) y la aprobación de su plan de cierre, ambos aprobados por SERNAGEOMIN. Para el caso del PAS, se especifican los contenidos técnicos y formales que deben presentarse para acreditar su cumplimiento según el apartado de construcción y operación de los depósitos de relaves del Artículo 135 del D.S. 40. Los cuales indican que se debe contar con una caracterización del sitio de emplazamiento del depósito de relaves junto

con las características del material de construcción de los muros, los contenidos solicitados para ambas se describen a continuación (SEA, 2020):

- **Geológicos:**

- Descripción de rocas, suelos y sedimentos del sector de emplazamiento del depósito, considerando estudios estratigráficos y descripción de contenido de sales, carbonatos, suelos arcillosos u otros.
- Mapa geológico que incluya estructuras, fallas y lineamientos (de dirección o menores) a escala adecuada, y perfiles geológicos del área de emplazamiento del depósito. Incluir la ubicación del depósito de relaves, y la traza de los perfiles elaborados.
- Estudios de peligros geológicos (remociones en masa, peligro volcánico, peligro sísmico, inundaciones, entre otros), en base a la susceptibilidad, vulnerabilidad y riesgo del área de emplazamiento. Estos estudios deben identificar los posibles impactos y plantear medidas de control que deben adoptarse si ocurriesen estos fenómenos.
- Geoquímica de rocas o unidades geometalúrgicas a explotar, que darán origen al relave, con un informe que respalde la caracterización mineralógica y su comportamiento geoquímico.
- En caso de considerar la construcción de un muro de empréstito, se debe indicar el origen del material y sus características geoquímicas y mineralógicas, así como también el potencial de drenaje ácido de estos materiales.
- Unidades geomorfológicas.

- **Geotécnicos:**

- Determinar los parámetros geotécnicos de los materiales constructivos del depósito, y analizar la influencia que tienen en el diseño de las obras. Además, se deben indicar los parámetros o características geotécnicas del suelo de fundación y laderas de apoyo de los estribos del depósito según corresponda, indicando todas las propiedades utilizadas en los modelos y diseños del depósito que aseguren su estabilidad física.
- Se deben indicar las campañas en terreno realizadas y previstas del proyecto, adjuntado sus principales resultados, certificados de ensayos realizados en terreno y laboratorio, y sus análisis respectivos.
- En el caso de utilizar materiales de empréstitos, se debe especificar el lugar de extracción, y descripción que asegure la no generación de drenaje ácido. Incluir el estudio y análisis de los sitios con disponibilidad de materiales que cumplan los requisitos, junto con los respectivos certificados de ensayos de terreno y de laboratorio. En caso de no disponer de empréstito suficiente, se debe indicar si se obtendrán de un tercero autorizado.
- Los antecedentes geotécnicos se deben entregar y documentar con el fin de prever

que no se va a generar una alteración significativa, una vez que se desarrolle el proyecto definitivo.

- Descripción de cobertura orgánica, vegetal y sus tipos.

- **Hidrológicos:**

- Descripción hidrológica de las cuencas relacionadas con el depósito de relaves, incorporando un plano que incluya al depósito y sus obras anexas, los cursos de agua superficiales presentes en el área, así como también las cuencas y subcuencas utilizadas en los cálculos de diseño del depósito y sus obras anexas, como canales de contorno y vertederos.
- Precipitaciones máximas y mínimas, distancia a las estaciones utilizadas como registro histórico, periodo considerado de registro histórico y actualizaciones de los modelos con los últimos años de registro de precipitaciones, según corresponda.

- **Hidrogeológicos:**

- Determinar los parámetros hidrogeológicos, como nivel freático, cantidad y tipos de acuíferos, conductividad hidráulica, direcciones de flujo, interacción agua superficial con agua subterránea, tipo de uso del agua subterránea, entre otros, y analizar la influencia que tienen en el diseño de las obras.
- Caracterización detallada de la hidrogeoquímica del agua subterránea.
- Modelo hidrogeológico conceptual, que describa las potenciales filtraciones que puedan ocurrir producto del depósito de relaves. Incluyendo todas las partes, obras y/o acciones diseñadas para el control de infiltración, con el objetivo de evitar el riesgo de afectar la estabilidad química de los acuíferos existentes en el sector.
- Modelo hidrogeológico numérico.
- Cronograma de actualización. Se deberá actualizar el modelo hidrogeológico presentado durante el periodo de operación del proyecto. Esta actualización debe realizarse al menos cada 5 años, o cada vez que los estudios realizados durante la operación produzcan cambios al modelo conceptual, indicando las variables y rangos de valores o índices que determinan la realización de dicha actualización, así como la incorporación de nuevas obras o modificaciones.
- Plan de monitoreo enfocado a la calidad de las aguas subterráneas y superficiales, con la finalidad de determinar las alteraciones en la composición de estas aguas. Incluir ubicación de piezómetros de monitoreo, diseño y características constructivas, e identificar qué acuífero y cuáles parámetros serán monitoreados.

- **Sísmicos:**

- Estudio de peligro sísmico específico del área de emplazamiento del depósito de relaves, considerando aspectos determinísticos y determinísticos-probabilísticos, para obtener el sismo máximo creíble (para el cierre y etapa de operación en que el análisis de estabilidad física sea crítico), y el sismo de diseño, y la correspondiente

aceleración horizontal del suelo a considerar en el diseño. Este debe tener en consideración sismos interplaca, intraplaca y corticales, e incluir todos los sismos históricos de relevancia que han afectado a la zona bajo análisis.

- Fallas activas. Descripción y antecedentes asociados a las fallas en la zona de estudio, su actividad y sismicidad cortical asociada.

- **Meteorológicos:**

- Tipo de clima.
- Radiación solar.
- Vientos (dirección, velocidad máxima y mínima, y temporalidad estacional).
- Temperaturas.
- Precipitaciones.
- Tasas de evaporación y evapotranspiración.

- **Topográficos:**

- Elevación máxima y mínima del terreno.
- Presentar planos y perfiles con pendientes medias, máximas y mínimas, y exposición.

Por otra parte, el plan de cierre es regulado por la Ley 20.819 (creada por la modificación de la Ley 20.551), a través del D.S. 41 que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras, obligando a las compañías mineras a mitigar los efectos de su desarrollo, asegurando la estabilidad física y química mediante un conjunto de medidas y acciones comprometidas en los planes de cierre, los que se deben actualizar cada cinco años.

Por último, los tranques y embalses de relaves se encuentran también regulados bajo el D.S. 50 del Ministerio de Obras Públicas (MOP), que fija las condiciones técnicas que deberán cumplir estos depósitos en la fase proyecto, así como también en su construcción y operación, vinculándolos directamente con el Código de Aguas de Chile (Artículo 295). Respecto a lo anterior, la Dirección General de Aguas (DGA), otorga la aprobación del proyecto de construcción, el cual debe estar previamente aprobado por el SERNAGEOMIN (Programa Tranque, 2018).

De lo mencionado anteriormente, se observa que el gran ente regulador de aprobar varias etapas de un proyecto de depósitos de relaves es el Servicio Nacional de Geología y Minería, comúnmente conocido como SERNAGEOMIN. Siendo su objetivo principal: “Mejorar la acción fiscalizadora a través de la criticidad de las faenas, con énfasis en la calidad de las fiscalizaciones, para fortalecer la seguridad de los trabajadores, disminuir la accidentabilidad y los riesgos en la industria extractiva minera, según la normativa vigente” (SERNAGEOMIN, s.f.). Este organismo, se encarga de recibir las solicitudes de los proyectos, revisarlos, aprobarlos y si corresponde, proponer modificaciones o rechazarlos,

además tiene entre sus funciones el dictar, aplicar y controlar normas específicas de seguridad minera a cumplir por los usuarios de los depósitos de relaves, así como también el fiscalizar la operación de los depósitos y velar por el cumplimiento de las obligaciones ambientales. Asimismo, participa activamente en la evaluación de impacto ambiental de los proyectos mineros. Por otro lado, la ley orgánica de la superintendencia del medio ambiente le otorgó la capacidad para fiscalizar los compromisos establecidos en las RCA, así como las denuncias asociadas, en el caso de existir (Programa Tranque, 2018).

Debido a la importancia de cumplir con el objetivo de lograr el control total del depósito, es que SERNAGEOMIN generó la “Guía Técnica de operación y Control de Depósitos de Relaves” (SERNAGEOMIN, 2007). En la cual, se mencionan algunos conceptos básicos y generalidades sobre relaves, al igual que opciones de descarga y tipos de relaves aceptables por la legislación chilena. Además, entrega recomendaciones a considerar sobre la operación y control de depósitos de relaves, destinadas principalmente como ayuda a los pequeños productores mineros que dentro del proceso de sus faenas incluyen a los tranques de relaves.

En la etapa de operación de un depósito de relaves, es de suma importancia mantener una fiscalización y monitoreo constante de sus parámetros físicos y químicos. Es por ello, que se creó un registro de control de los parámetros comprometidos en el diseño de los depósitos activos mediante el Formulario E-700 (ver **Anexo B**), el cual desde el año 2010, debe ser reportado trimestralmente por las compañías mineras con depósitos activos (SERNAGEOMIN, 2010). Siendo su objetivo el monitorear las mediciones de parámetros específicos, así como informes acompañantes que detallen trabajos de mantención, controles de instrumentos existentes, instalación de nuevos instrumentos o trabajos de operación, entre otros. La información que se adquiere mediante este formulario aborda aspectos relacionados con la estabilidad física del depósito.

A pesar de que, el formulario E-700 permite conocer ciertos parámetros importantes de estabilidad física, deja fuera aquellas variables relacionadas con la estabilidad química, por lo que es necesario ampliar el control sobre todos los aspectos relacionados con la estabilidad de los depósitos, tanto físicamente como químicamente, contribuyendo de este modo a disminuir los riesgos asociados a la salud de las personas y el medio ambiente. Es debido a lo anterior que, en el año 2015 SERNAGEOMIN y Fundación Chile publicaron la “Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras”, la cual tiene por objetivo: proponer criterios y lineamientos para el desarrollo de una estrategia de gestión de la estabilidad química de las instalaciones remanentes de una faena minera, acorde con la ley de cierre de faenas y contribuyendo al desarrollo de una minería sustentable. Esta guía entrega una orientación respecto a la caracterización geoquímica de un depósito de relaves, indicando que es primordial la realización de un reconocimiento en terreno de las fuentes posibles de generación de drenaje minero. Para lo cual, se deben utilizar indicadores in situ y descripciones preliminares de muestras de campo, siendo los equipos más utilizados para

la identificación petrográfica y mineralógica: la lupa, irradiador y la reacción con HCl; mientras que para el análisis elemental se suelen utilizar la fluorescencia de rayos X portátil (SERNAGEOMIN, CORFO & Fundación Chile, 2015). Por otro lado, menciona las técnicas instrumentales más utilizadas para el análisis de muestras en laboratorio, las cuales se pueden observar en la **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1: Listado de equipos de determinación de fase y técnicas de análisis para la predicción de drenaje minero.

Identificación y análisis químicos		
Identificación petrográfica y mineralógica		Lupa binocular
		Microscopio petrográfico
Técnicas instrumentales	Análisis elemental	Fluorescencia de Rayos X
		ICP-MS
		ICP-OES
		Espectrómetro de Absorción Atómica (AAS)
	Análisis mineralógico	Difracción de Rayos X
		Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)
		Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)
		QEMSCAN
		Espectroscopía Mössbauer
Análisis de Sulfuros		Volatilización
		Extracción química

Fuente: (SERNAGEOMIN, CORFO & Fundación Chile, 2015).

Además, en la guía de estabilidad química se mencionan los test estandarizados que generalmente se usan a nivel mundial para una caracterización geoquímica y predicción de la generación de drenaje minero, los cuales se clasifican como:

- **Cualitativos:** Estos corresponden a la determinación de la probabilidad y el grado de que se produzca drenaje minero, utilizando el balance entre los componentes generadores de ácido y los consumidores o neutralizadores, sin arrojar resultados concretos de la tasa de producción. Actualmente, se utilizan como técnicas cualitativas los test estáticos de laboratorios.
- **Cuantitativos:** Estos entregan valores concretos de la tasa de producción. En la

actualidad, las técnicas cuantitativas utilizadas son los test cinemáticos de campo y laboratorio.

Ambas técnicas se consideran como complementarias, de tal manera que los test cinemáticos se utilizan cuando los resultados obtenidos a partir de los test estáticos son inciertos o indican un claro potencial de generación de drenaje minero, de manera de validar e interpretar estos resultados prediciendo tasas de meteorización en el largo plazo, así como también la movilidad de contaminantes. Los métodos de laboratorio más utilizados para el análisis cuantitativo y cualitativo según la guía se muestran en la **Tabla 3.2**. Mientras que, las pruebas cinéticas de campos se pueden observar en la **Tabla 3.3**. De los test mencionados, se obtienen parámetros como: concentraciones de los elementos en las muestras analizadas, pH, temperatura, concentraciones de especies redox y Eh, entre otros. Los cuales permiten generar modelos geoquímicos de predicción de generación de drenaje minero tanto del sitio de emplazamiento del depósito como del relave (SERNAGEOMIN, CORFO & Fundación Chile, 2015).

Tabla 3.2: Listado de test estáticos y cinéticos de laboratorio para la predicción de drenaje minero.

Predicción de drenaje minero	
Test estáticos de laboratorio (cualitativos)	pH en Pasta y Conductividad
	Test ABA Modificado
	Determinación del potencial de Neutralización por Carbonato (CO ₃ -NP)
	Test NAG (simple, secuencial y cinético).
	B.C. Research Initial Test
	Test SPLP y TCLP
	Extracciones Secuenciales
	Test ABCC
	Test NAP
	Test (APP/S Ratio)
Test cinéticos de laboratorio (cuantitativos)	Celdas de Humedad
	Test en Columnas
	B.C. Research Confirmation Test
	Soxhlet Extraction

Fuente: (SERNAGEOMIN, CORFO & Fundación Chile, 2015).

Tabla 3.3: Listado de test cinéticos de campo para la predicción de drenaje minero.

Predicción de drenaje minero	
Test cinéticos de terreno (cuantitativos)	Test de barriles (pequeña escala)
	Test cinéticos de campo a mediana escala
	Pilas experimentales (mediana y gran escala)

Fuente: (SERNAGEOMIN, CORFO & Fundación Chile, 2015).

En el año 2018, se publicó la “guía metodológica para la evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remanentes”, la cual tiene por objetivo el proponer herramientas tecnológicas y criterios técnicos para evaluar y asegurar la estabilidad física de las instalaciones mineras remanentes, acorde a las exigencias de la Ley 20.551, para orientar a consultoras de ingeniería, empresas mineras y a SERNAGEOMIN (SERNAGEOMIN, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso & CORFO, 2018). En esta guía se menciona, que los tranques de relaves se ven expuesto a fallas de tipo: Licuación sísmica, inestabilidad de taludes, deformaciones, rebose (Overtopping), erosión interna (Pipping), licuación estática y/o inestabilidad del suelo de fundación. Para lo cual, se indica que los factores asociados a estos tipos de mecanismo de fallas son: Granulometría y plasticidad de la fracción fina, nivel de compactación, caracterización del suelo de fundación, posición de niveles freáticos, resistencia cíclica del depósito, funcionamiento del sistema de drenaje, aceleraciones sísmicas, entre otros. Por lo cual, para cumplir con la ficha de evaluación de requisitos técnicos para la evaluación de estabilidad física en depósitos de relaves, se debe incluir: los antecedentes topográficos del sector; calidad de arenas de relave (porcentaje de finos y límites de Atterberg); grado de compactación del depósito; antecedentes geológicos e hidrogeológicos, sondajes geotécnicos, ensayos in situ y ensayos en laboratorios; información sobre el nivel freático; antecedentes climáticos e hidrológicos; evaluación sísmica (estudio sísmico específico del sector de emplazamiento y regionalización sísmica de Chile); piezómetros en depósitos de relaves y suelo de fundación; monitoreo de presión de poros; sistema de drenaje; acelerómetros; e inclinómetros. Lo anterior, es similar a lo que se estipula en el requerimiento 2.2 del GISTM, ya que se abarca la caracterización geológica, geomorfológica, geotécnica, sísmica, hidrológica, hidrogeológica y climática del sitio de emplazamiento del depósito de relaves, además de las propiedades físicas del relave.

En el documento “Estudio de normativas internacionales de diseño, construcción, operación, cierre y post cierre de depósitos de relaves” (SERNAGEOMIN, 2018), se realizó un estudio comparativo de las normativas asociadas a los depósitos de relaves en Chile, Perú, México, Bolivia, Brasil, Argentina, Australia, Canadá, Reino Unido, Sudáfrica, Rusia y Estados Unidos, obteniéndose que sólo en México y Chile existe una ley que regula

específicamente las distintas fases de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves, siendo ambos casos excepcionales respecto de la claridad en la determinación de los cuerpos legales aplicables en materia de relaves mineros. El resto de las naciones incluidas en el estudio, opera a través de agrupaciones gremiales relacionadas con la gestión de grandes represas como ANCOLD (Australia), ICOLD (Europa) o CDA (Canadá), y aquellas agrupaciones mineras como el ICMM (International Council on Mining & Metals) o MAC (Canadá), ellas publican regularmente documentos de buenas prácticas, guías o manuales no obligatorios, donde se establecen lineamientos y prácticas sobre la gestión de los depósitos de relaves. En Chile, estos documentos son tomados como referentes para la gestión de los depósitos de relaves, instaurándose como herramientas a seguir de forma obligatoria de acuerdo con la legislación. Aunque existen empresas mineras que acatan internamente de forma voluntaria estas guías, como lo es BHP.

De manera complementaria, se creó el “Programa Tranque” que corresponde a un monitoreo en línea de depósitos de relave, desarrollado por la Fundación Chile con financiamiento CORFO, mineras privadas (AMSA, BHP y CODELCO) y asesoría de empresas consultoras como ARCADIS, cuyo objetivo está enfocado en el monitoreo de los muros de los depósitos de relaves. Por otro lado, también existe la campaña “Adopta un relave”, política que tiene por finalidad la protección del medio ambiente y la seguridad de las personas (Riveros, 2021).

Cabe destacar que Chile posee un prestigio internacional en el diseño de sus obras, ya que, a pesar de ser un país altamente sísmico, sus depósitos han tenido un comportamiento destacado, no ocurriendo ningún desastre y tampoco emergencias que pudieran significar riesgos mayores para la población, a excepción de aquellos tranques antiguos y abandonados por sus dueños que no tenían el respaldo de un diseño de ingeniería, como lo fue el de Las Palmas en el terremoto de 2010 (Riveros, 2021). Una causa de este comportamiento es la recomendación por parte de la normativa existente de depósitos de relaves, que indica la necesidad de integrar un programa de monitoreo donde sus datos sean transcritos correctamente, validando su fiabilidad, y almacenados de manera que estén disponibles para análisis futuros.

3.4 Asociaciones Internacionales

A continuación, se describen las agrupaciones gremiales y mineras internacionales que se utilizarán como referentes en el presente trabajo.

3.4.1 ICMM

En octubre de 1999, luego de una reunión entre las compañías mineras más influyentes de esa época, surgió la Iniciativa Minera Mundial (GMI, según sus siglas en inglés). La cual fue

dirigida por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, según sus siglas en inglés), con el objetivo de asegurar que la postura de la industria minera sea propositiva, tanto ante los desafíos y necesidades globales, como frente a las comunidades y los ambientes locales donde opera. De forma paralela, el WBCSD encomendó al Instituto Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo (IIED, según sus siglas en inglés) la realización de la iniciativa Minería, Minerales y Desarrollo Sostenible (MMSD, según sus siglas en inglés), con el fin de obtener respuestas a la interrogante de cómo la minería y la industria de los minerales pueden contribuir al desarrollo sustentable de las naciones. Ambas iniciativas, dieron origen en el año 2001 a la creación del Consejo Internacional de Minería y Metales, más conocido como ICMM según sus siglas en inglés. Esta organización busca promover una industria minera y metalúrgica segura, justa y sostenible (ICMM, s.f.). Actualmente, reúne a más de 27 empresas mineras y metalúrgicas, y a más de 35 asociaciones nacionales, regionales y de materias primas, fortaleciendo el desempeño ambiental y social del sector, y actuando como catalizador del cambio y mejorando el aporte de la minería a la sociedad. Todos los miembros de esta organización se suscriben a sus principios mineros, que incorporan requisitos ambientales, sociales y de gobierno corporativo integrales, una ratificación sólida de las expectativas de desempeño de los yacimientos y una garantía confiable de los informes de sostenibilidad empresarial con presentaciones públicas anuales.

El 05 de agosto del 2020, los miembros del ICMM se comprometieron a implementar el GISTM de forma tal, que todas las instalaciones con consecuencias potencialmente “Extremas” o “Muy elevadas” cumplirán con el Estándar dentro de tres años, y el resto de las instalaciones dentro de cinco años. Es por lo que, se elaboró la guía de “Protocolos de Conformidad: Global de la Industria en el Tratamiento de Relaves”, con el fin de respaldar ese compromiso. Esta guía respalda las autoevaluaciones y las evaluaciones independientes de terceros del progreso en la implementación del Estándar, detallando de forma clara y concisa los criterios que los evaluadores esperan que se demuestren para evaluar la conformidad, con ejemplos ilustrativos de pruebas y notas explicativas, según proceda (ICMM, 2021). Para el caso específico de este trabajo, esta guía indica que para cumplir con el requerimiento 2.2 se debe demostrar lo siguiente:

- La existencia de una caracterización detallada del(los) sitio(s) de la instalación de relaves, y esta debe actualizarse según su justificación a través del ciclo de vida, para reflejar los cambios materiales en las condiciones y nuevos conocimientos.
- La caracterización del sitio es respaldada por datos incluyendo datos en clima, geomorfología, geología, geoquímica, hidrología, hidrogeología (flujo y calidad de aguas superficiales y subsuelo), geotécnicos y sísmicos.
- La existencia de una caracterización de los relaves, considerando sus propiedades físicas y químicas, y su actualización a lo largo del ciclo de vida para tomar en cuenta la variabilidad en las propiedades, el procesamiento del mineral y la deposición de relaves.

Con el fin de cumplir con lo estipulado en el GISTM, y los protocolos de conformidad mencionados anteriormente, el ICMC implementó la guía de “Tailings Management: Good Practice Guide”, la cual pretende apoyar la gestión segura y responsable de los relaves en toda la industria minera, con el objetivo final de eliminar las muertes y los eventos catastróficos, proporcionando orientación sobre la buena gobernanza y las buenas prácticas de ingeniería que apoyan la mejora continua en la gestión de las instalaciones de relaves, y ayudan a fomentar y fortalecer una cultura de seguridad corporativa. En relación con la caracterización de un depósito de relaves, esta guía indica que se debe recopilar y considerar los posibles cambios futuros con una amplia gama de información, como por ejemplo (ICMC, 2021):

- Características geotécnicas, reológicas y geoquímicas de los relaves.
- Características y disponibilidad de los materiales que se vayan a utilizar para la construcción.
- Topografía del sitio de emplazamiento y otra información geográfica.
- Geomorfología.
- Geología e hidrogeología del macizo rocoso y del suelo.
- Geología estructural.
- Caracterización geotécnica del sitio de emplazamiento.
- Sismicidad.
- Hidrología.
- Clima y meteorología.
- Riesgos naturales (por ejemplo, deslizamientos de tierra, avalanchas, zonas de impacto de tsunamis, etc.).
- Medio ambiente terrestre, medio ambiente acuático, arqueología, factores socioeconómicos, consideraciones indígenas y otras consideraciones dentro de la huella de la instalación de relaves prevista, y en las zonas aguas arriba y aguas abajo.
- Consideraciones sobre el cambio climático.
- Estudios relacionados con la gestión del aire y del agua.

3.4.2 ANCOLD

El Comité Nacional Australiano de Grandes Represas, ANCOLD según sus siglas en inglés. Se formó en 1937, como el comité nacional australiano de la Comisión Internacional de Grandes Represas (ICOLD). Convirtiéndose en una asociación voluntaria conformada por organizaciones y profesionales individuales interesados en represas en Australia.

El objetivo de ANCOLD, es apoyar a sus miembros, difundir conocimientos, desarrollar capacidades y brindar orientación para lograr la excelencia en todos los aspectos de la ingeniería y la gestión de presas. Es por lo anterior, que este comité elaboró una guía sobre

la planificación, diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves en el año 2012 (ANCOLD, 2012).

Dicha guía fue elaborada para actualizar y ampliar las anteriores directrices sobre diseño, construcción y explotación de presas de relaves de 1999, también creada por ANCOLD. Esta actualización, fue realizada para revisar el contenido técnico general del documento original, destacar el riesgo existente en todos los aspectos del ciclo de vida de los depósitos de relaves y ampliar el asesoramiento sobre el diseño de las fases de cierre y post-cierre. Estas normas pretenden apoyar las regulaciones existentes, como "Tailings Management", una de las publicaciones que describe el "Programa de Desarrollo Sostenible de Prácticas Líderes para la Industria Minera" publicado por el Departamento de Industria, turismo y Recursos del Gobierno de Australia (DITR, 2007). Además, ANCOLD proporciona un asesoramiento adicional a aquellos que pretendan alcanzar el desarrollo sostenible, tal y como se define en el Informe Brundtland (UNWCED, 1987), y que el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM) adoptó como tal: "Un desarrollo que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer las capacidades de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades". Desde el sector de la minería y los metales, esto significa que las inversiones deben ser rentables desde el punto de vista económico, adecuadas desde el punto de vista técnico, respetuosas con el medio ambiente y socialmente responsables (ICMM, 2003).

Las directrices mencionadas anteriormente introducen el concepto de evolución del diseño, según el cual el diseño inicial debe adoptar parámetros conservadores, de "mejor estimación", sobre la base de los datos disponibles, que pueden ser progresivamente verificados, validados o refinados, a medida que se dispone de datos reales. Esto se conoce comúnmente como "el enfoque observacional" del diseño. Además, están dirigidas principalmente a proporcionar asesoramiento sobre el almacenamiento de relaves en la superficie, pero muchos de los principios se aplican a otras formas de contención de relaves. Dentro de los principios que se indican en la guía, se encuentra el apartado de tranques de relaves operativos, en este se indica que una supervisión del rendimiento del tranque de relaves es imperativa, ya que estos suelen estar diseñados para tolerar ciertas características previamente estipuladas en su etapa de diseño. Las desviaciones entre las características tomadas en un tiempo determinado y las características de diseño influyen en los procedimientos operativos y en el rendimiento del depósito de relave. Por lo cual, la caracterización de los relaves debe compararse en períodos no superiores a 6 meses.

Por otro lado, los índices globales de llenado, densidades, las formas de las playas, la recuperación de agua, entre otros, deben evaluarse en intervalos de 12 meses, y las variaciones significativas deben remitirse al equipo encargado del diseño de estas instalaciones. Es por ello, que la caracterización del relave operativo debe abordar todos los parámetros de diseño, en el **Anexo C** se pueda observar el contenido típico que debe contar un informe de diseño a presentar de un depósito de relaves en Australia. Estos parámetros

deben ser monitoreados durante toda la vida operativa del depósito, según lo estipulado por ANCOLD.

En (ANCOLD, 2012), específicamente en el apartado de caracterización de depósitos de relaves, se indica que se deben realizar pruebas a muestras representativas de los relaves e incluir pruebas in situ cuando sea posible, con el fin de lograr una correcta caracterización. Estas pruebas deben incluir las características físicas de los relaves (tanto de la pulpa como de los sólidos), incluyendo la posibilidad de segregación de partículas y las características geotécnicas, tales como: densidad aparente asentada, densidad seca, gravedad específica, parámetros de resistencia al cizallamiento, características de consolidación y permeabilidad. Así como también, la mineralogía/geoquímica (incluida la evaluación de la calidad del agua de descarga y el potencial de impacto en el medio ambiente), y las propiedades reológicas.

En la guía se menciona, que los procesos aplicados a la pulpa antes de su descarga, como la floculación, el espesamiento y el bombeo, afectan a los procesos que ocurren después de la deposición, como por ejemplo la segregación, el comportamiento de algunos relaves, los resultados de algunas pruebas, entre otros. Además, la química de la parte líquida de la pulpa, en particular el pH y la salinidad, puede influir significativamente en el comportamiento de los relaves en el secado y la rehumectación. Es por lo cual, que las características (incluidas la densidad, resistencia y compresibilidad) de los distintos componentes que conforman los relaves tras la segregación no serán los mismos que de los relaves iniciales. Por lo tanto, es necesario considerar si se producirá la segregación y, en caso de producirse, las propiedades de los componentes segregados.

La preparación de las muestras antes de las pruebas también debe tener en cuenta el origen y la naturaleza de la muestra. Debido a que, algunas propiedades de los relaves pueden ser afectadas por el historial de la pulpa. Otro factor importante, es el tiempo de almacenamiento, ya que, algunos materiales cambian sus características cuando se almacenan durante largos períodos de tiempo. Entre las pruebas que deben realizarse y que generalmente no se ven influidas por el historial de la pulpa, se encuentran: gravedad específica, distribución del tamaño de las partículas (Granulometría) y densidad seca máxima/mínima. Mientras que, las pruebas que si se ven influenciadas por el historial de la pulpa suelen ser: plasticidad (límites de Atterberg), densidad de consolidación, densidad tras el secado, características de segregación y parámetros reológicos. En el último caso, es conveniente que los ensayos se realicen con muestras tomadas o preparadas para reproducir las condiciones reales (ANCOLD, 2012).

Otro parámetro que se recomienda estudiar en la guía es la permeabilidad de los relaves, la cual depende del tamaño de las partículas, el grado de segregación, la cantidad y el tipo de minerales de arcilla presentes en los relaves, y la densidad alcanzada en el material en un momento dado. Es por ello, que se recomienda realizar pruebas de consolidación en

laboratorio de las muestras de relaves, las cuales proporcionan datos de permeabilidad para los relaves de baja densidad que no pueden probarse con permeámetros convencionales. Además, de pruebas in situ en pozos que permiten conocer las influencias de la estratificación y el agrietamiento por contracción.

Por otro lado, (ANCOLD, 2012) indica que las pruebas de resistencia más utilizadas son los ensayos triaxiales, aunque a veces se utilizan los métodos de caja de cizallamiento. ANCOLD, recomienda realizar ensayos triaxiales con mediciones de presión de poros, resistencia al corte efectivo y consolidado no drenado. También, señala que se deben caracterizar las propiedades de resistencia al cizallamiento, tanto drenadas como no drenadas de los relaves, junto con los parámetros de resistencia al cizallamiento residual si se esperan grandes deformaciones, en particular bajo cargas sísmicas.

Las pruebas in situ se realizan para muestreo por razones químicas o geoquímicas, evaluación de la resistencia in situ y/o del grado de consolidación, evaluación de la densidad en seco, evaluación de la permeabilidad, evaluación de la superficie freática y/o del grado de saturación y potencial de licuefacción. Para lo cual, se usan métodos típicos de investigación, como por ejemplo: perforación en pozos entubados, pruebas de penetración estándar (SPT) y muestreo de tubos no perturbados, pruebas de penetración de cono (CPT), preferiblemente junto con sondas de presión de poros (CPTu), pruebas de paletas de cizallamiento, pruebas de cono dinámico, evaluación de la densidad in situ mediante la prueba de sustitución de arena perforación manual y prueba de pozos, y métodos geofísicos. Los cuales, permiten evaluar el potencial de licuefacción y la resistencia al corte tras la licuefacción. En (ANCOLD, 2012), se menciona que las pruebas SPT no son continuas y no son suficientemente sensibles a los materiales de baja resistencia, por lo que se recomienda utilizar el método CPT.

De igual forma, indica la importancia de conocer los aspectos mineralógicos y químicos, junto con el conocimiento de las posibles variaciones en los tipos de minerales, variables de procesamiento, y las posibles reacciones al exponerse a la lluvia y al aire de los relaves. Para lo cual, se deben utilizar pruebas que consideren los efectos de la calidad de los lixiviados a corto y largo plazo con tasas de lavado simuladas. Además, la evaluación de la calidad del agua de los lixiviados debería tener en cuenta la lixiviación neutra, las reacciones redox y, si están presentes, los procesos de AMD.

Finalmente, ANCOLD señala que para determinar las características reológicas de los relaves se deben incluir pruebas de reómetro y/o de bucle de tubería.

3.4.3 MAC

En 1935, se creó la Asociación Minera de Canadá (MAC, según sus siglas en inglés) con el objetivo de representar a la industria minera canadiense en áreas clave de política pública que como lo es la eficiencia regulatoria, competitividad económica, desarrollo del Norte, cambio climático, responsabilidad social corporativa, asuntos indígenas y recursos humanos. Esta asociación, en la actualidad cuenta como miembros a 56 empresas asociadas al rubro y 54 compañías mineras, entre ellas BHP.

MAC brinda su conocimiento en diversas áreas de la industria minera en Canadá y en países extranjeros, llegando a lograr avances positivos en el tratamiento de problemas clave que surgen a nivel internacional, particularmente en países en desarrollo donde es más probable que las empresas mineras enfrenten problemas relacionados con la corrupción, las violaciones de los derechos humanos y los conflictos, y una gobernabilidad débil (MAC, s.f.).

La naturaleza de la minería es compleja, y también lo es integrar la Responsabilidad Corporativa (CR, según siglas en inglés) en el núcleo de un negocio para promulgar un cambio significativo. Cuando se realizan de manera efectiva, las prácticas sólidas de CR pueden ayudar a una empresa minera a mantener su privilegio de operar. Es por ello, que en el año 2004 MAC elaboró el primer sistema de rendimiento del mundo verificado externamente para CR, y el único implementado en el sitio de emplazamiento de la mina, el cual corresponde a la iniciativa hacia una minería sostenible (TSM, según sus siglas en inglés), esta permite a las empresas mineras convertir los compromisos medioambientales y sociales de alto nivel en acciones sobre el terreno. Al mismo tiempo, proporciona a las comunidades una valiosa información sobre la situación de las operaciones en áreas importantes, como la divulgación a la comunidad, gestión de los residuos y biodiversidad. Desde su inicio esta iniciativa ha generado avances notables en la relación entre las empresas mineras con sus comunidades, en la eficiencia energética en sus instalaciones y la gestión de riesgos ambientales. La incorporación en TSM es obligatoria para todos los miembros de MAC, y muchos de ellos han aplicado voluntariamente el programa en sus operaciones mineras en el extranjero (MAC, s.f.).

Una parte integral del TSM es la gestión de relaves, en esta área MAC ha mantenido un liderazgo internacional por más de dos décadas. El objetivo del apartado de gestión de relaves es trabajar continuamente para minimizar los daños mediante la aplicación de una gobernanza eficaz, y las mejores prácticas de ingeniería en la planificación, diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves. Cabe mencionar que, minimizar los daños abarca tanto los daños físicos como químicos, desempeño y riesgos asociados con las instalaciones de relaves. Es por lo anterior que el TSM, incluye indicadores que permiten medir el desempeño de la gestión de relaves, los cuales son (MAC, 2019):

- Política y/o compromisos para el manejo de relaves.
- Sistema de manejo de relaves y preparación para emergencias.
- Asignación de la responsabilidad del manejo de relaves.
- Revisión anual de la gestión.
- Manual de operación, mantenimiento y monitoreo (OMS).

El modo de calificar cada indicador es mediante el uso de niveles y criterios, según corresponda. Los niveles de calificación del desempeño utilizados son: C, B, A, AA, AAA, siendo los niveles C y B los que representan un mejor desempeño.

En el año 2021, MAC realizó una evaluación de las equivalencias entre los requisitos del TSM y el GISTM. Para el caso del requerimiento 2.2 del GISTM, el TSM también solicita los mismos requerimientos de caracterización tanto del sitio como del relave, específicamente en sus indicadores 2 y 5, respectivamente. Para lo cual, utiliza como orientación sus guías “Tailings Guide” y “OMS Guide” (MAC, 2021). Las cuales indican que la caracterización del sitio de emplazamiento implica la obtención y compilación de una amplia gama de información sobre una instalación de relaves y el entorno en el que está o estará ubicada. Por lo cual, se debe realizar durante la fase de planificación, y debe revisarse y actualizarse a lo largo del todo el ciclo de vida del depósito, para ayudar a garantizar que las decisiones se basen en un conocimiento preciso y actualizado del sitio de emplazamiento (MAC, 2021).

La información documentada como parte de la caracterización del depósito debe incluir: la características físicas y químicas de los relaves y, en caso que corresponda, los materiales que se utilizarán en la construcción de la instalación de relaves, incluyendo: contenido de humedad, gradación, mineralogía, geoquímica, resistencia al corte, compresibilidad, permeabilidad y pruebas de índice; características de los terraplenes, incluido el tipo de terraplén, el método de construcción y la clasificación de las consecuencias; características físicas y químicas de los cimientos de la instalación de relaves, y de los eventuales estribos, incluyendo: registros y ubicaciones de los pozos de prueba; resultados de las perforaciones, pruebas geofísicas, etc.; y los peligros naturales potenciales, como deslizamientos de tierra, avalanchas y torrentes de escombros, terremotos, inundaciones, levantamiento de escarcha, degradación del permafrost, olas, viento o movimiento o atasco del hielo (MAC, 2021).

Las guías “Tailings Guide” y “OMS Guide” recomiendan que, para la caracterización geológica e hidrogeología del sitio de emplazamiento de un depósito de relaves, se debe estudiar las unidades de rocas presentes en los cimientos del depósito y las zonas adyacentes, incluyendo su conductividad hidráulica. Además, de la presencia de fallas, acuíferos, acuitardos u otras características que influyan en la dirección y velocidad del flujo de las aguas subterráneas. También, se debe incorporar la profundidad del lecho rocoso,

estratigrafía de las unidades superficiales, presencia y extensión de depósitos de arcilla, potencial para causar problemas de estabilidad frente a la presencia de arcilla, presencia y extensión del material orgánico, nivel freático alto, arenas sueltas, residuos antiguos/tierra rellena, roca madre fracturada, etc. De igual forma, están guías recomiendan incluir la topografía del sector, la presencia de depósitos superficiales y características de la roca madre (contenido de humedad, gradación, mineralogía, geoquímica, resistencia al cizallamiento, compresibilidad, permeabilidad y pruebas de índice), geomorfología, recursos minerales o petrolíferos y el contenido elemental (MAC, 2021).

Para el caso de la caracterización de la hidrología local y regional, MAC recomienda estudiar los riachuelos, arroyos, ríos, estanques y lagos regionales; condiciones marinas; zona de captación; zonas aguas abajo que pueden verse afectadas; flujo y volumen de agua; y la química/calidad del agua. De manera complementaria, estas guías recomiendan analizar las características climáticas y meteorológicas, que incluyan un análisis de: temperatura, viento, evaporación, eventos estacionales y extremos, precipitación y calidad del aire. También, se deben considerar las proyecciones de las condiciones climáticas futuras, incluidos los cambios previstos en los fenómenos extremos y los cambios previstos en las condiciones "normales" estacionales y anuales.

Por otro lado, para la caracterización de la hidrogeología local y regional, estas guías indican que se debe contar con un estudio de los acuíferos, acuitardo, conductividad hidráulica dentro de la instalación de relaves y materiales subyacentes de la superficie, así como también la dirección del flujo, volumen y química/calidad de las aguas subterráneas.

Frente a lo anterior, todos los manuales, guías e iniciativas brindadas por MAC, han ayudado a ampliar el conocimiento acerca de los depósitos de relaves, y a su vez mejorar la gestión de estos residuos a nivel internacional. Es por lo que, algunos países toman estas normas como reglamentos obligatorios de control y monitoreo de los depósitos de relaves emplazados en su territorio, con el objetivo de prevenir catástrofes humanas y ambientales.

3.4.4 ICOLD

La Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, según sus siglas en inglés), es una organización internacional no gubernamental creada en 1928, la cual ofrece un foro para el intercambio de conocimientos y experiencia en ingeniería de presas. Además, dirige sus acciones a asegurar que las presas sean construidas de manera segura, económica y sin provocar efectos perjudiciales al medio ambiente (ICOLD, s.f.).

Su objetivo original era fomentar los avances en la planificación, diseño, construcción, explotación y mantenimiento de las instalaciones de grandes presas, recopilando y difundiendo la información pertinente, y estudiando las bases técnicas relacionadas. Sin

embargo, en la década de los setenta se agregaron nuevos temas a considerar, siendo estos la seguridad de las presas, control de su rendimiento, reanálisis de las presas y aliviaderos más antiguos, efectos del envejecimiento e impacto medioambiental. En años más recientes, se incorporaron nuevos temas como los estudios de costos en las fases de planificación y construcción, el aprovechamiento de los ríos internacionales, la divulgación de información al público en general, y la financiación.

En la actualidad, cuenta con 87 países miembros y más de 7.000 miembros individuales, entre los que se encuentran ingenieros, geólogos y científicos de organizaciones públicas y privadas, firmas consultoras, universidades y empresas constructoras. Estos miembros constituyen la Asamblea General, que se celebra anualmente, y tiene por objetivo resolver todos los temas relacionados con la organización y dirección de los estudios, investigaciones y experimentos, administración de todos los fondos y bienes, el funcionamiento de la Oficina Central y a cualquier otro asunto pertinente de la Comisión. Además, en ella se aprueba el presupuesto de ingresos y gastos, se nombra y organiza todos los Comités y se elige a los nuevos miembros. Cabe destacar, que desde 1996, Chile es un país miembro de ICOLD (ICOLD Chile, s.f.).

Para cumplir con sus objetivos, esta organización realiza comités técnicos que crean por año entre 3 - 10 libros técnicos, boletines o registros. Además, de congresos trianuales en los que se discuten diferentes aspectos técnicos, publicaciones de artículos que ocupan unas 6.000 páginas en 4 o 5 volúmenes, un Simposio de un día cada año, y por último un taller de medio día en años en que no se realiza el congreso (ICOLD Argentina, s.f.).

En 2021, ICOLD publicó el boletín “Tailings Dam Safety” con el fin de documentar las prácticas técnicas de planificación, diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves. Este documento, se basa en los boletines existentes producidos por ICOLD y a las directrices elaboradas por los países miembros, incluyendo Australia (ANCOLD), Canadá (CDA) y organismos industriales, como la Asociación Minera de Canadá (MAC) y el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM), con el fin de documentar las prácticas adecuadas para el diseño y gestión segura de los depósitos de relaves. La aplicación de los principios técnicos y de gobernanza descritos en el boletín, se realizan a lo largo de todas las fases de vida de una presa de relaves para lograr un nivel de seguridad que proteja las vidas humanas, la infraestructura social y el medio ambiente. Se espera que los aspectos técnicos del boletín sean utilizados por los ingenieros de relaves y otros profesionales que participan en diferentes áreas del ciclo de vida de los depósitos de relaves, y proporcionan información acerca de la gobernanza para ser utilizada por los propietarios (ICOLD, 2020).

A modo de referencia para lo estipulado en el requerimiento 2.2 del GISTM, el boletín “Tailings Dam Safety”, indica que una caracterización tanto del sitio de emplazamiento del depósito como del relave es esencial para el diseño, construcción, operación, cierre y post

cierre de un depósito de relaves. Dicha caracterización debe abarcar las áreas: climática, sísmica, entorno social, ambiental, geotécnicas, geoquímicas, geológicas, geomorfológicas, hidrológicas e hidrogeológicas. Para el caso de la caracterización del sitio de emplazamiento, esta guía recomienda que las condiciones geotécnicas y geológicas se deben determinar mediante estudios de oficina e investigaciones intrusivas y no intrusivas, las cuales se deben realizar en diferentes fases del ciclo de vida del depósito, con el fin de identificar y reducir progresivamente los riesgos e incertidumbres, y aumentar la fiabilidad de la información sobre el sitio de emplazamiento. Uno de los principales resultados de la caracterización del sitio, es un modelo de la geología regional, que abarca el macizo rocoso, suelo y estructuras presentes, además de la geomorfología local. Lo anterior, permite determinar los parámetros geotécnicos e hidrogeológicos asociados al sitio. El modelo global se denomina modelo geológico del sitio de emplazamiento (SGM, según sus siglas en inglés). El SGM debe centrarse no sólo en el depósito de relaves, sino también en la zona circundante que incluya la geología, geología estructural, geomorfología y las condiciones geotécnicas e hidrogeológicas. Es importante destacar que el alcance de las investigaciones del sector debe ser proporcional a la complejidad geotécnica del mismo, y a la consideración de las posibles consecuencias de una falla en el depósito de relaves.

Las actividades típicas que se llevan a cabo durante la caracterización del sitio de emplazamiento de un depósito de relaves, según el boletín son:

- Estudios de escritorio: por ejemplo, fotografía aérea/satelitales/LIDAR, búsquedas en Internet, informes gubernamentales, datos sísmicos, informes regionales, etc.
- Cartografía y visita al emplazamiento: cartografía del terreno y geológica, pozos de prueba y sondeos de campo, etc.
- Estudios geofísicos: sísmica, radar, resistividad, etc.
- Perforación y pruebas in situ: perforación sónica y rotatoria, extracción de núcleos y toma de muestras, pruebas de penetración de conos sísmicos (SCPT), pruebas de penetración estándar (SPT), paletas de campo, pruebas de empaquetamiento y pruebas de permeabilidad, etc.
- Pruebas de laboratorio: ensayos de índice, ensayos de resistencia, permeabilidad, consolidación, etc.
- Reportes: informes de datos y reportes de caracterización del sitio de emplazamiento.

Para el caso de la cartografía de la roca madre y de la geología superficial, se deben destacar las características que afectan a las propiedades geotécnicas, por ejemplo: la existencia de planos o estructuras de estratificación débiles, meteorización, esfuerzos tensionales naturales, entre otros. Mientras que, la evaluación de la geología superficial y geomorfología debe comenzar con la comprensión de la historia de la deposición o la meteorización, por ejemplo, la estratigrafía glacial, la meteorización física y geoquímica de la roca in situ, además de los mecanismos de transporte de sedimentos y la historia de la geología superficial regional.

Por otro lado, la caracterización geotécnica debe incluir, por ejemplo: la investigación relacionada con la estabilidad, la deformación, asentamientos, respuesta sísmica, infiltración y el potencial de erosión. Para el caso de la roca madre, se debe evaluar las unidades litológicas de roca, así como la orientación y distribución de los principales conjuntos de diaclasas dentro de cada unidad litológica. Además, es importante identificar las principales fallas y zonas de cizalla. La resistencia de la roca madre, estará influida por la orientación de los estratos, la meteorización y la calidad del macizo rocoso. Su conductividad hidráulica suele estar controlada por el grado de fracturación y de la calidad de la roca. Mientras que, en los suelos se deben delimitar las unidades geotécnicas representativas. Para lo cual, se utilizan las pruebas de índice de los suelos que incluyen: el contenido de humedad, tamaño de grano, los límites de Atterberg, densidad, resistencia al corte, entre otros. Las pruebas de resistencia deben considerar la respuesta de resistencia drenada y no drenada, la resistencia peak y residual/de gran deformación, así como el estado de tensión de los suelos y el estado de tensión que será impuesto por el depósito.

La interpretación de los datos geotécnicos del sitio de emplazamiento define las condiciones de los cimientos y el régimen de aguas subterráneas asociado. La predicción de la infiltración a través de los cimientos del depósito y desde el relave, se utilizan para apoyar el diseño de los controles de infiltración, drenaje y las predicciones de la presión de los poros para la evaluación de la estabilidad. Por lo cual, tanto el estudio de la hidrología como del clima son fundamentales, ya que, la cantidad de precipitaciones y el tipo de clima influyen en la velocidad de infiltración en el suelo y, además, podrían introducir presiones artesianas en las capas permeables confinadas y no confinadas del depósito. Por otro lado, los efectos térmicos pueden variar desde entornos áridos con alta evaporación hasta entornos árticos con permafrost. El calentamiento global está influyendo en los patrones climáticos, a menudo con aumentos en la intensidad de las precipitaciones de corta duración y condiciones potencialmente más húmedas o secas de lo normal. Es debido a lo anterior, que es necesario comprender el potencial de los cambios para apoyar el dimensionamiento de los depósitos, las desviaciones y los requisitos de almacenamiento de las inundaciones.

En el caso de la caracterización sísmica, se recomienda realizar una evaluación sismo-tectónicas, para comprender las condiciones tectónicas regionales que afectan al sitio de emplazamiento del depósito de relaves, además realizar un análisis de la peligrosidad sísmica del sector. La cual debe incluir el evento/parámetros del sismo de diseño que se utilizarán para la evaluación de la respuesta sísmica del depósito y los cimientos. Además, el análisis debe considerar la evaluación de la peligrosidad sísmica probabilística (PSHA), que determina los eventos para varias probabilidades de superación anual, y la peligrosidad sísmica determinista que identifica las fallas potencialmente activas y la respuesta del depósito debido a la falla. Ambos casos deben considerarse para el diseño del depósito y la selección para el diseño debe ser el caso más crítico.

Por otra parte, el boletín indica que la caracterización del relave debe incluir: propiedades in situ que se determinan mediante estudios de campo: pruebas de penetración de cono sísmico con mediciones de presión de poros (SCPTu), pruebas de penetración estándar (SPT), pruebas de paletas de cizallamiento de campo y densidad. Además, debe incluir ensayos de laboratorios, como, por ejemplo: granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica, entre otros. De igual forma, debe contar con una caracterización geoquímica para determinar el potencial de lixiviación de metales y de drenaje ácido de roca (ML/ARD) en condiciones neutras y ácidas, respectivamente. Para lo cual se deben realizar pruebas geoquímicas mediante ensayos estáticos, y ensayos cinéticos.

3.4.5 EGBC

En el año 2017, la Asociación de Ingenieros y Geocientíficos Profesionales de la Columbia Británica (APEGBC, según sus siglas en inglés), cambió su nombre a Ingenieros y Geocientíficos de la Columbia Británica (EGBC, según sus siglas en inglés). EGBC, es una organización canadiense sin fines de lucro gobernada por un consejo de miembros electos y personas designadas por el gobierno. El Consejo, es responsable de la gobernanza y gestión de la organización ante el público, a través del Ministerio de la fiscalía general, bajo la Oficina del Superintendente de Gobernanza Profesional (EGBC, s.f.).

La EGBC, se encarga de proteger el interés público al establecer y mantener altos estándares académicos, de experiencia y de práctica profesional para los más de 40,000 inscritos. Por lo cual, se encarga de regular y fiscalizar a los ingenieros y geocientíficos que ejercen en la provincia de la Columbia Británica bajo la autoridad de la Ley de Gobernanza Profesional, la cual estipula que sólo las personas y empresas con licencia de ingenieros y geocientíficos de la Columbia Británica están autorizadas por ley a emprender y asumir la responsabilidad de proyectos de ingeniería y geociencias en la provincia.

Por otro lado, a modo de respuesta a la recomendación N°6 del informe del panel de expertos independientes en investigación y revisión de ingeniería sobre la rotura de la instalación de almacenamiento de relaves de Mount Polley, el EGBC creó la guía “site characterization for dam foundations in BC”. La cual tiene por objetivo el definir una práctica profesional estándar adecuada para la caracterización del sitio de emplazamiento de un depósito de relaves, y así mejorar su seguridad y garantizar que no se repitan incidentes como el de Mount Polley (EGBC, 2016). Además, la guía proporciona una herramienta para gestionar las incertidumbres asociadas con el resultado de un programa de caracterización del sitio de emplazamiento de un depósito de relaves, regulado por el reglamento de seguridad de presas de la Columbia Británica y/o las condiciones de los permisos en virtud de la Ley de Minas y de otras legislaciones provinciales o federales pertinentes.

Según lo mencionado en la guía, las actividades típicas de diseño recomendadas para la caracterización del sitio de emplazamiento de un depósito de relaves se pueden observar en la **Figura 3.7**. Dichas actividades permiten la construcción del Modelo geológico del sitio (SGM, según sus siglas en inglés), el cual ayuda a comprender de manera clara y tridimensional la geología y geomorfología del sitio de emplazamiento del depósito. Este modelo se construye con información de las siguientes áreas: geología estructural, geología superficial y del lecho rocoso, geomorfología, las condiciones geotécnicas, hidrogeología y las condiciones sismotectónicas.

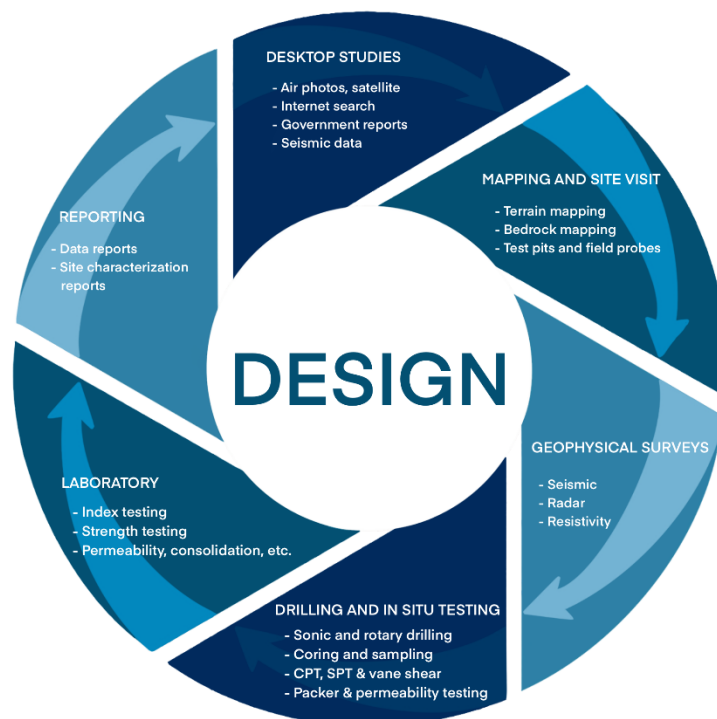


Figura 3.7: Actividades típicas de caracterización del sitio de emplazamiento de un depósito de relaves en la etapa de diseño.

Fuente: (EGBC, 2016).

Según lo indicado en la guía, las características geomorfológicas, geológicas y estructurales del sector se deben obtener a partir de estudios geofísicos, topográficos, campañas de perforación, ensayos in situ y de laboratorios, imágenes satelitales, fotografías aéreas, imágenes LiDAR o InSAR, entre otros. Los estudios geofísicos que usualmente se utilizan para caracterizar son: refracción/reflexión sísmica, estudios eléctricos y/o electromagnéticos, radar de penetración en el suelo y estudios gravimétricos. Por otro lado, para la geología superficial se debe realizar un análisis de peligros geológicos y de estabilidad del suelo que influirá al depósito (EGBC, 2016).

Para el caso del componente geotécnico del sitio, la guía menciona que se debe contar con investigaciones de estabilidad, deformación, asentamiento, respuesta sísmica, infiltración y

potencial de erosión. Para lo cual, se debe evaluar la distribución espacial de las unidades litológicas de roca, así como la orientación y distribución de las principales estructuras dentro de cada unidad. Además, se debe determinar la resistencia de la roca madre, así como su conductividad hidráulica, grado de meteorización, grado de fracturación e índice de resistencia geológica. De igual forma, se deben realizar pruebas de índice de los suelos que incluyan: el contenido de humedad, tamaño de grano, límites de Atterberg, índices de densidad, resistencia al corte por penetración, consolidación, entre otros. Cabe mencionar que las pruebas de resistencia deben considerar la respuesta de la resistencia drenada y no drenada, la resistencia máxima y residual de deformación, así como también el estado de tensión de los suelos y las condiciones de tensión que serán impuestas por la presa. Por otro lado, el análisis de las propiedades de deformación de los materiales debe considerar el historial de tensiones, el estado de tensiones previo a la consolidación, el grado de sobreconsolidación y los coeficientes de compresión, recompresión y consolidación. De igual forma, se debe determinar el potencial de licuefacción de los materiales frente a cargas estáticas y dinámicas, por lo cual se debe analizar el grado de saturación, densidad, estado de tensión y las propiedades de drenaje (EGBC, 2016).

La evaluación hidrogeológica del sector según lo indica la guía debe enfocarse en analizar los factores que influyen en los niveles, calidad, flujos y las filtraciones de las aguas subterráneas. La predicción de la infiltración a través de los cimientos de la presa y desde la zona del embalse, se utiliza para apoyar el diseño de los sistemas de control, conducción, recogida y mitigación de la infiltración, así como la evaluación de los posibles impactos aguas abajo en el entorno receptor. También, se utiliza para apoyar el diseño de los filtros y los controles de las tuberías, y para evaluar el potencial de las presiones de elevación artesiana dentro de los cimientos de la presa. Los métodos de investigación usualmente utilizados como parte de las caracterizaciones hidrogeológicas incluyen:

- Recorrido y cartografía del emplazamiento.
- Perforación y registro de la capa de rodadura/roca (la metodología debe seleccionarse teniendo en cuenta las condiciones del lugar, los requisitos de las pruebas y el acceso).
- Instalación de pozos de control y bombeo, y de instrumentos de control.
- Pruebas hidráulicas "puntuales" (por ejemplo, pruebas de empaquetamiento y de bateo).
- Pruebas de bombeo (que miden la respuesta del acuífero al bombeo).
- Pruebas de la zona no saturada (por ejemplo, pruebas de infiltración de doble anillo, pruebas de permeámetro).
- Medición del nivel de las aguas subterráneas (incluida la instrumentación), medición del flujo de las aguas superficiales y muestreo de la calidad de las aguas subterráneas/superficiales.
- Estudios geofísicos (de fondo de pozo y regionales).

De acuerdo con la guía, la caracterización hidrológica del sector debe incluir lo siguiente:

- Distribución e importancia de las unidades hidrogeológicas (acuíferos, acuitardos y acuicludos) asociadas a la roca madre y a los estratos de sobrecarga.
- Características hidráulicas (conductividad hidráulica, anisotropía, transmisividad, características de almacenamiento) del lecho rocoso y la sobrecarga, incluidas las características estructurales (por ejemplo, fallas).
- Niveles de aguas subterráneas, direcciones de flujo, gradientes, calidad de las aguas y factores que pueden influir en dicha calidad, incluyendo la variabilidad temporal y estacional.
- Calidad de las aguas subterráneas con respecto a la calidad de referencia y la geoquímica de los tipos de aguas subterráneas.
- Interconectividad entre las aguas subterráneas y las superficiales (por ejemplo, flujo de base), y mecanismos y ubicaciones de recarga y descarga.
- Ubicación y características de los receptores de aguas subterráneas cercanos (por ejemplo, humedales o manantiales alimentados por aguas subterráneas), usuarios (por ejemplo, pozos existentes) e infraestructuras existentes que puedan influir en las aguas subterráneas (por ejemplo, fuentes de contaminación).

La información obtenida de la caracterización hidrológica se utiliza para desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual. Este modelo, entregará detalles de las extensiones/fronteras del SGM y cómo se han seleccionado, además de las condiciones geoquímicas de referencia (si la calidad del agua subterránea es un problema potencial), una representación visual sencilla del sistema de aguas subterráneas, una descripción de las unidades hidroestratigráficas claves y de los procesos que influyen en las aguas subterráneas. Así como también, los componentes cuantitativos (balance del flujo de aguas subterráneas, rangos de datos hidráulicos para las unidades clave de sobrecarga/roca), y detalles de la influencia de la presa sobre el sistema de aguas subterráneas. El modelo hidrológico de diseño final será utilizado como referencia para analizar las diferencias que puedan existir a medida que el proyecto del depósito avanza en su construcción y operación.

Por otro parte, para la evaluación sismotectónica se indica que esta debe incluir la comprensión de las condiciones tectónicas regionales que influyen en el sitio de emplazamiento del depósito, lo cual permite la obtención de parámetros de riesgo sísmico para el sitio. Estos parámetros incluyen los eventos/parámetros de diseño del movimiento del suelo y los de respuesta de los cimientos que se utilizarán para la evaluación de la respuesta sísmica de la presa, los cimientos y los taludes del embalse. El análisis de la peligrosidad sísmica debe considerar dos enfoques, el probabilístico (determina los eventos para varias probabilidades de superación anual) y el determinista (determina la peligrosidad sísmica causada por las fallas identificadas). La guía menciona que la evaluación del entorno sismotectónico debe considerar el área regional (hasta un radio de 500 kilómetros) e incluir

las siguientes consideraciones (EGBC, 2016):

- El entorno de las placas tectónicas con respecto a las posibles zonas de subducción y los terrenos tectonoestratigráficos que puedan tener fallas activas asociadas.
- Fallas regionales identificadas en los mapas de riesgo geológico y sísmico, y en las imágenes de fotografía aérea, satélite y LiDAR.
- Evidencia de posibles movimientos de fallas del Holoceno (por ejemplo, escarpas que desplazan depósitos de suelo glacial o reciente).
- Sismicidad inducida por el hombre (por ejemplo, hidrofracturación, hundimiento de la extracción de gas/petróleo, voladura de minas).

La determinación de los movimientos sísmicos del suelo generalmente asume condiciones de "suelo firme" o "roca", que serían una entrada al modelo analítico para la presa que consideraría las condiciones del suelo y la roca de los cimientos. Por consiguiente, la comprensión de las condiciones de los cimientos es una consideración importante en el análisis sísmico. La profundidad de los suelos bajo la presa y la velocidad de la onda de corte de los suelos son datos importantes para ese análisis y deben determinarse. Las velocidades de las ondas de corte de baja deformación pueden determinarse a partir de mediciones de campo utilizando estudios sísmicos de fondo o lineales o de suelos similares en las proximidades del emplazamiento. Las incertidumbres en las propiedades del suelo deben ser estimadas.

Tanto la hidrología como el clima influyen en la geología superficial, la hidrogeología y las condiciones geotécnicas en torno a la cimentación de la presa, así como en los requisitos de dimensionamiento y diseño de esta. Por lo cual, el estudio de ambas es primordial, ya que, la cantidad de precipitaciones y el ciclo climático influyen en la tasa de infiltración en el suelo y, además, podrían introducir presiones artesianas en las capas permeables confinadas y no confinadas de la cimentación de la presa (EGBC, 2016).

Finalmente, la guía indica que el uso de instrumentación de monitoreo (por ejemplo, tubos verticales, piezómetros, indicadores de pendiente, etc.), es un componente importante del programa de caracterización del emplazamiento. La instrumentación se debe instalar en el sector aguas abajo del depósito, así como también en el mismo depósito, con el fin de mantener un monitoreo constante en las diferentes etapas de vida del depósito.

4. Metodología de gestión de control para el cumplimiento del requerimiento 2.2 del GISTM

Para definir la metodología de gestión de control interno del cumplimiento del requerimiento 2.2 del GISTM, se considera la recopilación, análisis y organización de la información proporcionada por las normas nacionales y las asociaciones internacionales

mencionadas en el **capítulo 3**, guiándose principalmente por las actividades y parámetros de caracterización obligatorios en Chile.

La metodología por proponer se divide en dos partes: la caracterización del sitio de emplazamiento y la caracterización del relave, en cada una de ellas se especifican las actividades, estudios, ensayos y parámetros necesarios para caracterizar cada área a analizar.

Es importante mencionar que, para el manejo de las caracterizaciones obtenidas, se debe incorporar e implementar el uso de plataformas que permitan que el acceso a la información de todos los valores de los parámetros obtenidos, sean fácil de manejar y obtener para que la toma de decisión, monitoreo y gestión del depósito sea más eficiente. Así como también, se debe destacar que la frecuencia de revisión de los parámetros con los de diseño, debe variar entre los 6 a 12 meses. Mientras que, las caracterizaciones deben realizarse cada 5 años o en caso de algún evento no previsto.

Por otra parte, la utilización de instrumentos o técnicas de última generación (las últimas creadas y/o publicadas), son imperativas para la realización de los estudios, ensayos, actividades y análisis que componen las caracterizaciones. Debido a que, con el tiempo y el avance tecnológico se van mejorando y/o actualizando las teorías, metodologías, técnicas e instrumentos que se suelen utilizar. Lo anterior, aumenta la eficiencia y disminuye la incertidumbre de los valores obtenidos, lo cual mejora la gestión y control de los depósitos de relaves.

4.1. Caracterización del sitio de emplazamiento

Como se mencionó anteriormente, la primera parte de la metodología consiste en definir los parámetros, estudios, ensayos, actividades y análisis necesarios para cumplir con la caracterización del sitio de emplazamiento del tranque de relaves de Minera Spence, según lo indicado en el requerimiento 2.2 del GISTM.

La caracterización climática debe incluir un estudio climático que incluya información sobre el tipo de clima en donde está inmerso Minera Spence, al igual que aquellos climas que colindan y afectan o pueden afectar al sector, así como también debe incluir los eventos estacionales y extremos que afectan al sector y las áreas cercanas a él, como por ejemplo el invierno altiplánico. Además, la caracterización debe contar con una base de datos y análisis de parámetros meteorológicos obtenidos por las estaciones a disposición más cercanas al depósito, y que detecten y almacén la pluviometría, temperatura, dirección y velocidad del viento, radiación solar, evaporación y humedad relativa del área a estudiar. De igual forma, debe incorporar un estudio de la calidad del aire previo y posterior a la construcción del depósito, y en las diferentes etapas de su vida útil, según corresponda.

Un estudio del cambio climático debe formar parte de la caracterización climática, por lo cual se debe investigar y analizar el comportamiento de los parámetros meteorológicos del sector, y de la región a lo largo de los años, incluyendo una evaluación y análisis de los cambios meteorológicos que presentan regiones o lugares en el mundo con características similares al lugar del emplazamiento, con el fin de generar una proyección de los cambios que se generarán en el futuro, y con ello predecir vulnerabilidades del depósito frente a posibles eventos climáticos no previstos.

Por otro lado, las caracterizaciones geomorfológicas, geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas se deben hacer en base a la recopilación de informes regionales y gubernamentales a disposición, campañas de calicatas y sondeos (realizadas en las diferentes etapas de vida del depósito, según corresponda), imágenes satelitales, fotografías aéreas, LiDAR y/o InSAR, estudios topográficos y estudios geofísicos. Con lo anterior, se logra obtener las unidades geomorfológicas existentes en el sector, así como también su estratigrafía, peligros geológicos latentes, unidades y perfiles geológicos, y la geología estructural local y regional. Lo mencionado anteriormente, permite la construcción del modelo geológico del área.

Para el caso de la caracterización hidrológica, esta debe incluir la descripción y estudios de las cuencas y subcuencas hidrográficas, canales, vertederos y cursos de aguas cercanas, y que pueden generar una influencia sobre el sitio de emplazamiento del depósito, así como también el análisis histórico de las precipitaciones máximas y mínimas registradas en el sector a lo largo de los años. Mientras que, en la caracterización hidrogeología se debe determinar el nivel freático, la curva de retención de agua (SWRC), y el tipo, cantidad y propiedades de las unidades hidrogeológicas presentes en el sector. Además, de los parámetros hidráulicos, y la dirección, velocidad, volumen e hidrogeoquímica del flujo. Así como también, se debe analizar y definir la interacción del agua superficial con el agua subterránea, zonas de recarga y descarga, y la tasa de infiltración. Con todo lo mencionado anteriormente, se logra construir el modelo hidrogeológico conceptual y numérico del sector, el cual debe incluir el balance de agua completo y las características de las instalaciones de drenaje del depósito de relaves. Es importante destacar que, el equipo que se utiliza para monitorear el cumpliendo respecto a los límites de diseño, tanto para las aguas subterráneas como el nivel freático del depósito de relaves es el piezómetro, este se debe instalar aguas abajo de los muros y en diferentes áreas dentro del depósito.

La caracterización geoquímica del sitio de emplazamiento del depósito de relaves debe realizarse a partir de ensayos in situ y ensayos en laboratorios de muestras “inalteradas” tomadas en terreno. Los cuales, deben permitir la obtención de la composición elemental y mineralógica del área, su petrografía y propiedades químicas. Algunas de las técnicas instrumentales, análisis y test que se recomiendan utilizar para este tipo de caracterización, son:

- **Ensayos in situ:** En este caso se analizan muestras en terreno, con el fin de determinar lo siguiente:
 - Identificación petrográfica y mineralógica: Las técnicas que se suelen utilizar para la identificación son: lupa, rayador, reacción con HCl, entre otros.
 - Análisis elemental: Para determinar la composición elemental, la fluorescencia de Rayos X Portátil es la técnica e instrumento que se suele utilizar en la actualidad.
- **Ensayos en laboratorios:** En este caso se analizan en laboratorios muestras “inalteradas” tomadas en terreno, para lograr determinar lo siguiente:
 - Identificación petrográfica y mineralógica: Los instrumentos que generalmente se utilizan son la lupa binocular y el microscopio petrográfico.
 - Las técnicas instrumentales que se deben utilizar para el análisis elemental y mineralógicos son:
 - Análisis elemental: Para el estudio elemental generalmente se utilizan las siguientes técnicas: Fluorescencia de rayos X (XRF), ICP-MS, ICP-OES y espectrómetro de absorción atómica (AAS).
 - Análisis mineralógico: Para este análisis se utilizan: Difracción de Rayos X (XRD), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM), QEMSCAN y Espectroscopía Mössbauer.
- **Análisis de sulfuros:** Las técnicas que se suelen utilizar son: volatilización y extracción química.
- **Test de Salinidad:** Se debe determinar el pH de la muestra, conductividad eléctrica y RAS.
- **Análisis del potencial de drenaje minero:** Para determinar el potencial se deben realizar ensayos estáticos, los más utilizados en la industria son el ABA modificado, NAG (simple y/o secuencial) y los test de lixiviación (SPLP, Shake Flask Extraction, entre otros). Así como también, se debe realizar ensayos cinéticos (celdas húmedas, test en columnas, B.C. Research Confirmation Test, Soxhlet Extraction, etc.).

Por otro lado, la caracterización geotécnica del sitio se debe basar en las campañas de sondajes y calicatas realizadas en el sector, las cuales permitirán describir las propiedades y características tanto del suelo como del macizo rocoso. A partir de las muestras tomadas, se debe determinar la clasificación del suelo, la cual se obtiene a partir del análisis granulométrico, límites de Atterberg y peso específico de las muestras, el método de clasificación más utilizado es el USCS, pero en la actualidad existe un nuevo método de clasificación siendo este el revisado de clasificación de suelos (RSCS, según sus siglas en inglés), el cual aporta más información acerca de la importancia mecánica e hidráulica del

material fino, por lo cual se recomienda utilizarlo de manera complementaria con el método USCS. De igual forma, la caracterización debe contar con el peso unitario, permeabilidad, potencial de colapso, proctor estándar y/o modificado, resistencia al corte simple, resistencia cíclica, compresión simple, triaxiales CIU y CID, contenido humedad, resistencia in situ con medición de presión de poros (CPTu), potencial de licuefacción frente a cargas estáticas y dinámicas, y la clasificación geotécnica del macizo rocoso del sitio de emplazamiento (ejemplo: RMR, GSI, RQD, etc.). Cabe mencionar que para determinar la resistencia in situ se recomienda el uso del método CPT, ya que, es más preciso y continuo que el SPT.

Debido a que, el tranque de relaves de Minera Spence se encuentra ubicado en el desierto de Atacama, el cual se caracteriza por poseer una alta salinidad, es que el estudio de sales es primordial. Por ende, la caracterización debe incluir: el contenido de sales solubles, su distribución en el sitio según el tipo de sal presente, concentración y comportamiento.

Por último, la caracterización sísmica del sitio debe basarse en el análisis de las fuentes sísmicas que están presentes en la región del emplazamiento, así como también en la evaluación del historial sísmico regional y local. Lo mencionado, establece las bases del estudio del peligro sísmico, el cual debe incluir la clasificación del suelo de fundación, evaluación determinista y la evaluación probabilística. Además, la caracterización debe incluir la evaluación de la sismicidad inducida en el sector.

Todo lo indicado anteriormente, se convierte en la planilla de cumplimiento del requerimiento 2.2 del GISTM para el sitio de emplazamiento del tranque de relaves de Minera Spence, la cual se puede apreciar en la **Tabla 4.1**. Esta planilla, permitirá evaluar el estado actual de caracterización de Minera Spence respecto a la metodología propuesta. Es importante destacar, que la persona que debe completar esta planilla debe ser el ingeniero a cargo del Tranque de relaves de Minera Spence, debido al alto contenido técnico que abarca esta metodología.

Tabla 4.1: Planilla de cumplimiento de la metodología propuesta para la caracterización del sitio de emplazamiento del tranque de relaves de Minera Spence.

Requerimientos	¿Cumple con ...?	¿Está en una plataforma digital?	¿Su última actualización fue ≤ 5 años?	¿Se utilizaron técnicas o instrumentos de última generación?	Observaciones
Clima					
Estudio climático (tipo de clima,					

eventos estacionales y extremos, etc.)					
Comportamiento y análisis de los siguientes parámetros meteorológicos:					
- Pluviometría.					
- Temperatura.					
- Dirección y velocidad del viento.					
- Radiación Solar.					
- Evaporación.					
- Humedad relativa.					
Comportamiento de la calidad del aire previo a la construcción del depósito, así como también de la fase de construcción y operación.					
Estudio del cambio climático (análisis histórico de parámetros meteorológicos, etc.).					
Geomorfología					
Unidades geomorfológicas.					
Geología					
Topografía:					
- Imágenes satelitales.					
- LiDAR o InSAR.					
- Fotografías aéreas.					
- Levantamiento de datos en terreno.					
Estudios geofísicos.					
Estratigrafía.					
Estudio de peligros geológicos.					
Estudio de la geología estructural local y regional.					
Análisis de la composición del suelo y macizo rocoso.					
Definición de unidades geológicas.					
Perfiles geológicos.					
Modelo geológico del sitio de emplazamiento.					
Geoquímica					

<u>Ensayos in situ:</u>					
- Identificación petrográfica y mineralógica (Lupa y rayador, reacción con HCl, etc.)					
- Análisis elemental (Fluorescencia de rayos X Portátil).					
<u>Identificación y análisis químicos en Laboratorio:</u>					
- Identificación petrográfica y mineralógica (Lupa binocular, microscopio petrográfico, etc.)					
- Análisis elemental (Fluorescencia de Rayos X, ICP-MS, ICP-OES, espectrómetro de absorción atómica, etc.).					
- Análisis mineralógico (Difracción de Rayos X, microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía electrónica de transmisión (TEM), QEMSCAN, espectroscopia Mössbauer, etc.).					
Análisis de sulfuros (Volatilización, extracción química, etc.).					
Test de salinidad (pH, conductividad eléctrica y RAS).					
<u>Ensayos estáticos:</u>					
- ABA modificado.					
- NAG (simple y/o secuencial).					
- Ensayos de lixiviación.					
Ensayos cinéticos (celdas húmedas, test en columnas, B.C. Research Confirmation Test, Soxhlet Extraction, etc.).					
Hidrología e Hidrogeología					
Descripción de cuencas y subcuencas hidrográficas, canales, vertederos y cursos de aguas cercanas al depósito.					
Registro histórico de precipitaciones máximas y					

mínimas, captadas por las estaciones más cercanas al depósito.					
Tipo y características de las unidades hidrogeológicas.					
Curva de retención de agua (SWRC).					
Obtención de parámetros hidráulicos, nivel freático, y la dirección, velocidad y volumen del flujo.					
Definición de la interacción del agua superficial con el agua subterránea, áreas de recarga y descarga.					
Análisis hidrogeoquímico.					
Tasas de infiltración.					
Modelo hidrológico e hidrogeológico conceptual y numérico.					
Plan de monitoreo enfocado a la calidad de las aguas subterráneas: - Piezómetros.					
Geotécnia					
Clasificación geotécnica del macizo rocoso.					
Clasificación de suelo (análisis granulométrico, límites Atterberg y peso específico). Se recomienda utilizar ya sea de manera complementaria o única al método RSCS.					
Contenido de humedad, densidad aparente y porosidad.					
Peso unitario.					
Permeabilidad.					
Resistencia in situ con medición de presión de poros (CPTu), y densidad in situ.					
Potencial de licuefacción frente a cargas estáticas y dinámicas.					
Análisis de la resistencia drenada y no drenada.					

Potencial de colapso.					
Ensayo de Proctor (estándar y/o modificado).					
Análisis del contenido de sales solubles, incluyendo su distribución, tipo, concentración y comportamiento geotécnico.					
Sismicidad					
Análisis de las fuentes sísmicas que originan los sismos en el sector.					
Evaluación del historial sísmico local y regional del sector de emplazamiento.					
Descripción y antecedentes de la actividad sísmica de fallas locales y regionales.					
Estudio de peligro sísmico:					
- Clasificación de suelos.					
- Evaluación probabilística.					
- Evaluación determinista.					
Análisis de sismicidad inducida.					

Simbología

- Si.
- Parcialmente.
- No.

Esta planilla tiene por objetivo principal la verificación del cumplimiento de los requerimientos (estudios, ensayos, parámetros, etc.), que deben ser parte de la caracterización del sitio de emplazamiento del tranque de relaves de Minera Spence, según la metodología propuesta. Para dicha verificación, se utilizan “semáforos de colores”, donde el color verde indica que si se cumple el requerimiento, mientras que el de color amarillo indica que su cumplimiento es parcial, y por último el de color rojo indica que no se cumple con el requerimiento. Para analizar en mayor detalle el cumplimiento de los requerimientos, se generaron cuatro columnas de verificación, la primera permite evaluar que los datos de cada requerimiento estén en una plataforma digital de fácil acceso, es decir, softwares que permitan almacenar datos y que generen estadísticas de estos mismos (ejemplo: el software EXCEL). Mientras que, la segunda verifica que los datos se hayan actualizado en un período menor o igual a 5 años. La tercera columna, evalúa que en la obtención de los datos se hayan utilizado instrumentos o técnicas de última generación. Por último, la cuarta columna denominada observaciones, permite agregar información respecto a las verificaciones

anteriores y/o acotaciones de cada requerimiento.

4.2. Caracterización del relave

La segunda parte de la metodología se enfoca en definir los parámetros, estudios, ensayos, y análisis, necesarios para cumplir con la caracterización física y química del relave depositado, y de las infraestructuras que forman parte del tranque de Minera Spence, con el fin de dar cumplimiento a lo estipulado en el requerimiento 2.2 del GISTM.

Las propiedades físicas y químicas de los relaves, y las infraestructuras del tranque (muros, diques, laguna operacional etc.), se deben obtener a partir de ensayos in situ, monitoreo continuo y el análisis de muestras en laboratorios. Para el caso del monitoreo continuo, se deben utilizar los siguientes instrumentos: acelerómetros, inclinómetros y piezómetros, los cuales se deben instalar en las diferentes infraestructuras que componen al depósito de relaves, según los puntos de interés.

Las características físicas de los relaves y las infraestructuras del depósito deben incluir: densidad aparente, gravedad específica, densidad seca, contenido de humedad, porosidad, densidad in situ y resistencia in situ con medición de presión de poros. En esta última, se recomienda utilizar el método CPTu para su obtención, ya que, este mide y entrega la presión de poros. Otra propiedad que debe incluirse es el grado de compactación, la cual se obtiene a través de los métodos de proctor simple y/o modificado. Además, las caracterizaciones deben contar con un estudio y análisis de la segregación que se genera en el depósito, un análisis del comportamiento reológico del relave, la permeabilidad in situ y en laboratorio del relave, su curva de retención de agua (SWRC) y las características del nivel freático en el depósito. Así como también, se debe obtener la clasificación de suelo, para lo cual se debe realizar un análisis granulométrico, límites de Atterberg y peso específico a las muestras tomadas del depósito. Por último, pero no menos importante se deben realizar ensayos de resistencia estática y cíclica a las muestras tomadas del depósito, para obtener sus propiedades geotécnicas, y a su vez determinar el potencial de licuefacción estático y dinámico.

Por otro lado, la caracterización de las propiedades químicas y geoquímicas de los relaves y las infraestructuras del tranque, debe incluir la obtención in situ del pH, conductividad eléctrica (CE) y análisis elemental. Al igual que, se debe incluir ensayos en laboratorios aplicados a muestras tomadas del relave como de otros puntos del depósito, con el fin de identificar su: petrografía y mineralogía, análisis elemental, análisis mineralógico y análisis de sulfuros. Para el caso de la primera, se suelen utilizar la lupa binocular, microscopio petrográfico, entre otros. Para la segunda, las técnicas más utilizadas son: fluorescencia de Rayos X, ICP-MS, ICP-OES, espectrómetro de absorción atómica, entre otras. Para la tercera, se pueden utilizar las siguientes técnicas: difracción de Rayos X, microscopía

electrónica de barrido (SEM), microscopía electrónica de transmisión (TEM), QUEMSCAN, espectroscopia Mössbauer, entre otras. Para el caso de la cuarta, se pueden utilizar las siguientes técnicas: la volatilización, extracción química, entre otras.

Debido a que, los relaves son residuos mineros con potencial de generación de drenaje minero, el análisis y predicción de ese potencial se debe hacer a partir de técnicas cualitativas y cuantitativas. Para el caso de las primeras, estas se enfocan en determinar la probabilidad y grado de que se produzca drenaje minero, mediante el análisis del balance entre los componentes generadores de ácido y los consumidores o neutralizadores, sin arrojar resultados concretos de la tasa de producción. Los ensayos que se deben utilizar para evaluar esta técnica, se denominan ensayos estáticos, de estos se recomiendan realizar los siguientes: la evaluación del pH en pasta y conductividad eléctrica, test ABA modificado, test NAG completo (simple y/o secuencial) y ensayos de lixiviación. De este último, los más utilizados en la industria son: Shake Flask Extraction y SPLP.

Por otro lado, las técnicas cuantitativas permiten confirmar el potencial de generación de acidez, y a su vez predecir la calidad de las aguas de drenaje cuando los materiales son sometidos a condiciones de meteorización en condiciones controladas. Los ensayos que se deben utilizar para esta técnica se denominan ensayos cinéticos, entre los que se encuentran: las celdas húmedas, test en columnas, B.C. Research Confirmation Test, Soxhlet Extraction, entre otros.

Es importante destacar, que a pesar de que los ensayos estáticos y cinéticos se pueden interpretar por separado, se consideran como técnicas complementarias. De tal forma que, los ensayos cinéticos se utilizan cuando los resultados obtenidos a partir de los ensayos estáticos son inciertos o indican un claro potencial de generación de drenaje minero, lo cual permite validar e interpretar estos resultados, prediciendo tasas de meteorización en el largo plazo, así como la movilidad de contaminantes.

Otro parámetro que debe formar parte de las caracterizaciones es la hidrogeoquímica tanto de la parte líquida del relave como del agua de la laguna operacional y agua presente en el sistema de drenaje.

Aparte de las caracterizaciones que deben realizarse al depósito, y que ya fueron mencionadas, se debe incluir el estudio y análisis geológico, y geoquímico del material extraído de la mina que se convertirá en el relave.

Con lo mencionado anteriormente, se construye la planilla de cumplimiento del requerimiento 2.2 del GISTM para el relave depositado en Minera Spence, la cual se puede apreciar en la **Tabla 4.2**. Esta planilla, permite evaluar la forma en que se caracteriza el relave en Minera Spence respecto a la metodología propuesta. Como se indicó en el capítulo

anterior, la persona que debe completar esta planilla debe ser el ingeniero a cargo del tranque de relaves de Minera Spence, debido al alto contenido técnico y responsabilidad que abarca la metodología propuesta.

Tabla 4.2: Planilla de cumplimiento de la metodología propuesta para la caracterización del relave depositado en Minera Spence.

Requerimientos	¿Cumple con ...?	¿Está en una plataforma digital?	¿Su última actualización fue ≤ 5 años?	¿Se utilizaron técnicas o instrumentos de última generación?	Observaciones
Propiedades Físicas					
Densidad aparente, gravedad específica, densidad seca, contenido de humedad y porosidad.					
Resistencia in situ con presión de poros. (CPTu) y densidad in situ.					
Ensayo de Proctor (modificado y/o simple).					
Estudio y análisis de la segregación.					
Comportamiento y análisis reológico.					
Análisis de la permeabilidad.					
Curva de retención de agua (SWRC).					
Características del nivel freático.					
Clasificación de suelo (análisis granulométrico, límites de Atterberg y peso específico).					
Parámetros de resistencia estática y cíclica.					
Análisis de la licuefacción estática y dinámica.					
Geoquímica					
<u>Ensayos in situ:</u>					
- pH y conductividad eléctrica (CE).					
- Análisis elemental (Fluorescencia de rayos X Portátil).					

<u>Ensayos de laboratorios:</u>					
- Identificación petrográfica y mineralógica (Lupa binocular, microscopio petrográfico, etc.).					
- Análisis elemental (Fluorescencia de Rayos X, ICP-MS, ICP-OES, espectrómetro de absorción atómica, etc.).					
- Análisis mineralógico (Difracción de Rayos X, microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía electrónica de transmisión (TEM), QEMSCAN, espectroscopia Mössbauer, etc.).					
<u>Ensayos estáticos:</u>					
- pH en pasta y conductividad eléctrica.					
- Test ABA modificado.					
- Test NAG (simple y/o secuencial).					
- Ensayos de lixiviación.					
Ensayos cinéticos (celdas húmedas, test en columnas, B.C. Research Confirmation Test, Soxhlet Extraction, etc.).					
Análisis hidrogeoquímico del agua presente en: el relave, laguna operacional y el sistema de drenaje.					
Requerimientos complementarios					
Estudio y análisis de la geología y geoquímica del material que da origen al relave.					

Simbología

- Si.
- Parcialmente.
- No.

La planilla propuesta permite la verificación del cumplimiento de los requerimientos (estudios, ensayos, parámetros, etc.), que deben ser parte de la caracterización del relave depositado y de las infraestructuras que componen al tranque de Minera Spence. Al igual que la planilla descrita en el **capítulo 4.1**, esta cuenta con 4 columnas de verificación y el modo

de verificaciones es mediante la utilización de semáforos.

5. Cumplimiento corporativo del requerimiento 2.2 del GISTM

A nivel corporativo, BHP estableció un procedimiento para cumplir con los requerimientos del GISTM y sus respectivos protocolos de conformidad del ICMM. Para el caso del requerimiento 2.2, este indica que la caracterización del sitio de emplazamiento debe ser completada con suficiente detalle para su análisis en la Revisión de Seguridad de Depósitos (DSR, según sus siglas en inglés), los procesos de aseguramiento y en la Inspección de Seguridad de Depósitos (DSI, según sus siglas en inglés), con el fin de ser compartidas en la Comisión Independiente de Revisión de Relaves (ITRB, según sus siglas en inglés). La DSR debe ser firmada por el ingeniero de registro (EoR, según sus siglas en inglés) y la ITRB.

El resultado de la revisión de la caracterización debe ser informada al ingeniero responsable de las instalaciones de relaves (RTFE, según sus siglas en inglés). También, en el procedimiento de cumplimiento del requerimiento 2.2 se indica que se debe utilizar la norma geoquímica de AMD creada por BHP, para la caracterización geoquímica del relave y del emplazamiento, así como también indica que se debe mantener una base de datos fácilmente accesible que contenga datos históricos.

Cabe mencionar que, el DSR y DSI corresponden a una revisión e inspección independiente de la seguridad de las instalaciones de relaves, respectivamente. Ambas, abarcan los aspectos técnicos, operativos y de gobernanza, y son llevadas a cabo por un especialista técnico independiente conforme a las mejores prácticas establecidas. Estas deben realizarse con la frecuencia que se determine, de acuerdo con la clasificación por consecuencias y la complejidad de su estado o de su desempeño, siendo en algunas jurisdicciones una exigencia legal.

Por otro lado, la ITRB corresponde a una comisión independiente que brinda una revisión técnica del diseño, construcción, operación, cierre y gestión de las instalaciones de relaves. Los integrantes de esta comisión son terceros que no están, ni estuvieron involucrados directamente con el diseño o la operación de la instalación de relaves en revisión. Los conocimientos y la experiencia de los miembros del ITRB deben ser un reflejo de la diversidad de temas relevantes para la instalación y su contexto, y de su complejidad. En algunas jurisdicciones con fuertes regulaciones, principalmente en Japón, la función de la ITRB es asumida por las autoridades regulatorias responsables.

Por otra parte, el EoR es un ingeniero calificado responsable de confirmar que la instalación de relaves sea diseñada, construida, operada y desmantelada con la debida atención a la integridad de la instalación, y que se alinea y cumple con las reglamentaciones, leyes, directrices, códigos y estándares aplicables. El EoR, pertenece a una empresa externa que

presta servicios al dueño del depósito, y este podrá delegar funciones pero no su responsabilidad. En algunas jurisdicciones con fuertes regulaciones, principalmente en Japón, la función del EoR es asumida por las autoridades regulatorias responsables.

Mientras que, el RTFE corresponde a un ingeniero designado por el operador como el responsable del depósito de relaves. Este debe estar disponible en todo momento durante la construcción, operación y cierre. Tiene una responsabilidad definida y delegada para la gestión de la instalación de relaves, y cuenta con las calificaciones y experiencia adecuadas y compatibles con el nivel de complejidad de la instalación. El RTFE es responsable de los requisitos de alcance del trabajo y de índole presupuestarios de la instalación de relaves, incluida la gestión de riesgos. Puede delegar tareas y obligaciones específicas para aspectos de la gestión de relaves a personal calificado, pero no puede delegar su responsabilidad.

6. Aplicación de la metodología

En este capítulo se presenta la aplicación de la metodología propuesta en el **capítulo 4**, mediante la revisión de la caracterización que actualmente se realiza tanto en el tranque de relaves de Minera Spence como en su suelo de fundación.

6.1 Caracterización del sitio de emplazamiento

La planilla propuesta en el **capítulo 4.1** es completada con las caracterizaciones que se realizan o realizaron en el suelo de fundación del tranque de relaves de Minera Spence (ver **Tabla 6.1**). Lo cual, permite evaluar el cumplimiento de los requerimientos de la metodología propuesta para la caracterización del sitio de emplazamiento del depósito de relaves en Minera Spence, y a su vez del requerimiento 2.2 del GISTM.

Tabla 6.1: Planilla de cumplimiento de los requerimientos de la metodología propuesta para la caracterización del suelo de fundación del tranque de relaves de Minera Spence.

Requerimientos	¿Cumple con ...?	¿Está en una plataforma digital?	¿Su última actualización fue ≤ 5 años?	¿Se utilizaron técnicas o instrumentos de última generación?	Observaciones
Clima					
Estudio climático (tipo de clima, eventos estacionales y extremos, etc.)	●	●	●	●	Si bien se realizó un estudio del tipo de clima en que está inmerso el

					tranque, este no se ha actualizó respecto a los cambios que se han generado en los últimos 5 años. Además, dicho estudio está disponible en PDF, y esto no es bueno a la hora de trabajar con los datos.
Comportamiento y análisis de los siguientes parámetros meteorológicos:					
- Pluviometría.	●	●	●	●	En el período de 2017 hasta abril de 2022, se apreció una descalibración considerable en los valores extremos que se registraron, y subieron a la plataforma de gestión ambiental de Spence, por lo cual se recomienda revisar y confirmar dichos valores captados previo a su publicación en la plataforma, con el fin de evitar posible confusiones y errores en cálculos o modelaciones posteriores. E incluso si es necesario mejorar o cambiar el sensor de captación de datos y/o el software de la
- Temperatura.	●	●	●	●	
- Dirección y velocidad del viento.	●	●	●	●	
- Radiación Solar.	●	●	●	●	
- Evaporación.	●	●	●	●	
- Humedad relativa.	●	●	●	●	

					plataforma.
Comportamiento de la calidad del aire previo a la construcción del depósito, así como también de la fase de construcción y operación.	●	●	●	●	Falta un análisis global que incluya el comportamiento previo a la construcción, durante ella y de su etapa operativa. Solo se cuenta con análisis por separado.
Estudio del cambio climático (análisis histórico de parámetros meteorológicos, etc.).	●	●	●	●	Falta un análisis y comparativa de los cambios que han sucedido a lo largo de los años producto del cambio climático, y una proyección de ellos en el futuro.
Geomorfología					
Unidades geomorfológicas.	●	●	●	●	Los estudios y análisis se guardan en formato PDF, por lo cual se recomienda buscar una plataforma que sea más interactiva con el usuario.
Geología					
Topografía:					
- Imágenes satelitales.	●	●	●	●	Se utilizan aplicaciones de libre acceso, y aplicaciones de cobro.
- LiDAR o InSAR.	●	●	●	●	No se cuenta con modelos generados por LiDAR o InSAR.
- Fotografías aéreas.	●	●	●	●	Se toman imágenes

					mediante el uso de drones.
- Levantamiento de datos en terreno.	●	●	●	●	Se realizaron viajes al terreno para evaluar visualmente el sector, tomándose fotos para respaldo y su posterior análisis.
Estudios geofísicos.	●	●	●	●	Se utilizan tres métodos geofísicos, los cuales son: gravimetría, TEM y MASW.
Estratigrafía.	●	●	●	●	Se analiza a través de los sondeos y calicatas realizados.
Estudio de peligros geológicos.	●	●	●	●	Los sectores que se verán afectados frente a un peligro geológico están identificados, así como también su influencia sobre las instalaciones del depósito.
Estudio de la geología estructural local y regional.	●	●	●	●	Se utilizaron estudios disponibles de privados y públicos, así como también estudios propios.
Análisis de la composición del suelo y macizo rocoso.	●	●	●	●	Se hace a partir de sondeos y calicatas.
Definición de unidades geológicas.	●	●	●	●	
Perfiles geológicos.	●	●	●	●	Se realizaron a partir de las campañas de

					sondajes y los estudios geofísicos.
Modelo geológico del sitio de emplazamiento.	●	●	●	●	
Geoquímica					
<u>Ensayos in situ:</u>					
- Identificación petrográfica y mineralógica (Lupa y rayador, reacción con HCl, etc.)	●	●	●	●	Se realiza reacción con HCl
- Análisis elemental (Fluorescencia de rayos X Portátil).	●	●	●	●	No se realiza.
<u>Identificación y análisis químicos en Laboratorio:</u>					
- Identificación petrográfica y mineralógica (Lupa binocular, microscopio petrográfico, etc.)	●	●	●	●	
- Análisis elemental (Fluorescencia de Rayos X, ICP-MS, ICP-OES, espectrómetro de absorción atómica, etc.).	●	●	●	●	El análisis elemental se hace a través del ensayo roca total, que utiliza la técnica de ICP-OES.
- Análisis mineralógico (Difracción de Rayos X, microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía electrónica de transmisión (TEM), QEMSCAN, espectroscopia Mössbauer, etc.).	●	●	●	●	Para el análisis mineralógico se utiliza la técnica del TESCAN.
Análisis de sulfuros (Volatilización, extracción química, etc.).	●	●	●	●	Se analiza el azufre total.
Test de salinidad (pH, conductividad eléctrica y RAS)	●	●	●	●	
<u>Ensayos estáticos:</u>					
- ABA modificado.	●	●	●	●	
- NAG (simple y/o secuencial).	●	●	●	●	

- Ensayos de lixiviación.	●	●	●	●	Los ensayos de lixiviación (extracción) que se utilizan son: Shake Flask Extraction y SPLP.
Ensayos cinéticos (celdas húmedas, test en columnas, B.C. Research Confirmation Test, Soxhlet Extraction, etc.).	●	●	●	●	Se utiliza la técnica de celdas húmedas.
Hidrología e Hidrogeología					
Descripción de cuencas y subcuencas hidrográficas, canales, vertederos y cursos de aguas cercanas al depósito.	●	●	●	●	Han sido estudiados y verificados desde 2016. Estos requerimientos son parte de la modelación hidrológica e hidrogeológica conceptual y numérica, respectivamente.
Registro histórico de precipitaciones máximas y mínimas, captadas por las estaciones más cercanas al depósito.	●	●	●	●	
Tipo y características de las unidades hidrogeológicas.	●	●	●	●	
Curva de retención de agua (SWRC).	●	●	●	●	
Obtención de parámetros hidráulicos, nivel freático, y la dirección, velocidad y volumen del flujo.	●	●	●	●	
Definición de la interacción del agua superficial con el agua subterránea, áreas de recarga y descarga.	●	●	●	●	La última presentación de estos modelos por parte de las consultoras fue en el 2021.
Análisis hidrogeoquímico.	●	●	●	●	Se analiza el agua vertida al depósito, la captada por el sistema de drenaje y el agua del acuitardo que está aguas abajo del depósito.
Tasas de infiltración.	●	●	●	●	Para su análisis se

					utilizan los métodos de sondajes y calicatas, en donde se aplican los ensayos Lefranc y Lugeon para el primer método. Mientras que, para el segundo se utiliza el doble anillo y permeámetro de Guelph.
Modelo hidrológico e hidrogeológico conceptual y numérico.	●	●	●	●	Ambos modelos han sido revisados y validados por diferentes consultoras a lo largo de la vida del depósito.
Plan de monitoreo enfocado en analizar la calidad de las aguas subterráneas: - Piezómetros	●	●	●	●	Fueron instalados en todos los muros que contienen al depósito, así como también en la laguna operacional, dique, celdas y aguas abajo del muro.
Geotécnia					
Clasificación geotécnica del macizo rocoso.	●	●	●	●	Se utilizan los métodos de RQD y RMR para clasificar geotécnicamente al macizo.
Clasificación de suelo (análisis granulométrico, límites Atterberg y peso específico). Se recomienda utilizar el método RSCS.	●	●	●	●	Se utiliza el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS), este sistema es el más utilizado en la actualidad. Sin

					embargo, como ya se mencionó anteriormente, se recomienda utilizar como complemento el sistema RSCS, el cual es relativamente nuevo, el cual se enfoca en mejorar el análisis de finos, respecto al USCS.
Contenido de humedad, densidad aparente y porosidad.	●	●	●	●	Son parte de las propiedades físicas analizadas en laboratorios de las muestras.
Peso unitario.	●	●	●	●	
Permeabilidad.	●	●	●	●	Se analizaron mediante el análisis de sondajes y calicatas.
Resistencia in situ con medición de presión de poros (CPTu), y densidad in situ.	●	●	●	●	El ensayo que se utiliza para determinar este parámetro es el SPT, como ya se mencionó este método es menos sensible en comparación con el método CPTu. Por lo cual, se recomienda cambiar el método o incorporarlo, y a su vez generar análisis comparativo entre ambos métodos para el sector.
Potencial de licuefacción frente a cargas estáticas y dinámicas.	●	●	●	●	Se determinan a partir de ensayos in situ (CPTu o SPT)

Análisis de la resistencia drenada y no drenada.	●	●	●	●	y ensayos de laboratorios (ensayos triaxiales monótonos y cíclicos drenados y no drenados (CID y CIU), corte simple, corte simple cíclico y compresión simple).
Potencial de colapso.	●	●	●	●	La versión de las normas utilizadas para ambos ensayos debe actualizarse a la última versión que corresponde al año 2021, respectivamente.
Ensayo de Proctor (estándar y/o modificado).	●	●	●	●	El método de ensayo utilizado es el Proctor modificado.
Análisis del contenido de sales solubles, incluyendo su distribución, tipo, concentración y comportamiento geotécnico .	●	●	●	●	Actualmente, se cuenta con una análisis de la distribución y profundidad del contenido de sales solubles, pero en este no se toma en cuenta el tipo de sales predominante en cada sector.
Sismicidad					
Análisis de las fuentes sísmicas que originan los sismos en el sector.	●	●	●	●	La obtención, análisis y conclusión de los datos, se realizó por diversas empresas contratistas. Los resultados y conclusiones
Evaluación del historial sísmico local y regional del sector de emplazamiento.	●	●	●	●	
Descripción y antecedentes de la actividad sísmica de fallas locales y regionales.	●	●	●	●	

Estudio de peligro sísmico:					fueron verificados y validados por especialistas senior y BHP.
- Clasificación de suelos.	●	●	●	●	
- Evaluación probabilística.	●	●	●	●	
- Evaluación determinista.	●	●	●	●	
Análisis de sismicidad inducida.	●	●	●	●	La captura de datos se hace a partir de acelerómetros, que están distribuidos en diferentes sectores que componen las instalaciones del depósito.

Simbología

- Si.
- Parcialmente.
- No.

Como se observa en la **Tabla 6.1**, los parámetros meteorológicos están en plataformas digitales de fácil acceso y gestión, así como también los estudios, evaluaciones, parámetros y análisis de la geomorfología, geología, hidrología e hidrogeología y sismicidad del suelo de fundación. Mientras que, los demás se almacenan y presentan en archivos tipo PDF. Además, en la planilla se logra apreciar que todos los requerimientos fueron evaluados o realizados en períodos inferiores o iguales a 5 años.

Para el caso de la caracterización climática, el estudio del tipo clima en donde está inmerso el sitio de emplazamiento, utiliza la zonificación meteorológica de Chile como una forma de caracterizar el sitio. Si bien, se cuentan con estaciones meteorológicas que captan datos en tiempo real, no se utilizan como fuentes de actualización de los valores de las zonificaciones utilizadas como referentes. Por otro lado, en la actualidad el estudio del cambio climático está en un período de revisión, actualización y mejoramiento, por lo cual en el corto plazo cumplirá con el requerimiento de forma completa.

Por otra parte, los modelos 3D generados por la tecnología LiDAR o InSAR, no forman parte de la caracterización topográfica realizada en el sitio de emplazamiento previo a la construcción del depósito, y en la actualidad no forman parte de la caracterización a corto y largo plazo que se tiene prevista en el sitio de emplazamiento del tranque de relaves.

Los análisis, estudios y ensayos geoquímicos realizados in situ y en laboratorios, son entregados en formato PDF. Lo cual, no cumple con la recomendación de la metodología propuesta que indica la utilización de plataformas digitales de almacenamiento de datos, y que permitan la realización de estadísticas del comportamiento de cada dato geoquímico del suelo de fundación. Cabe destacar, que el análisis elemental in situ no forma parte de la caracterización que se hizo ni hace en el sitio de emplazamiento, pero forma parte de las caracterizaciones que se realizarán a corto y largo plazo en el emplazamiento.

En el ámbito de la hidrogeología, se analiza la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas mediante la captación de muestras en pozos de observación. Mientras que, las propiedades de presión y profundidad del agua se obtienen de los piezómetros, los cuales se ubican aguas abajo de los muros.

Por otra parte, el método que se utiliza para la clasificación de suelos es el USCS, y según la metodología se debería complementar con el método RSCS. Este último, aún no es un ensayo normado, pero su utilización va en aumento en la industria debido a su enfoque en el análisis de finos. Los valores de: contenido de humedad, densidad aparente, porosidad, peso unitario, permeabilidad, resistencia y densidad in situ, análisis de la resistencia drenada y no drenada, potencial de colapso y compactación (proctor estándar y/o modificado) del suelo de fundación, no están disponibles en plataformas digitales en las que se puedan generar estadísticas o análisis del comportamiento histórico de estos parámetros, solo están disponibles en formato de documento tipo PDF. Para el caso de la resistencia in situ, el método utilizado en las caracterizaciones realizadas con anterioridad fue el SPT, este método no es el recomendado en la metodología propuesta y en la industria, por lo cual para las caracterizaciones planificadas en el corto y largo plazo se utilizará el método del CPT.

El análisis de contenido de sales solubles se hace a partir de las muestras tomadas en sondeos, los cuales están ubicados en el sector donde están emplazados los muros del tranque. Si bien, se cuenta con una distribución espacial y de profundidad del contenido de sales, este no entrega información del tipo de sal presente y la concentración de cada tipo.

6.2 Caracterización del relave

En la **Tabla 6.2**, se observa la aplicación de la metodología y planilla propuesta en el **capítulo 4.2**. La planilla es completada con los datos de las caracterizaciones realizadas al relave y las infraestructuras que forman parte del depósito.

Tabla 6.2: Planilla de cumplimiento de los requerimientos de la metodología propuesta para la caracterización del depósito de relaves de Minera Spence.

Requerimientos	¿Cumple con ...?	¿Está en una plataforma digital?	¿Su última actualización fue ≤ 5 años?	¿Se utilizaron técnicas o instrumentos de última generación?	Observaciones
Propiedades Físicas					
Densidad aparente, gravedad específica, densidad seca, contenido de humedad y porosidad.	●	●	●	●	En la actualidad, no se determina la porosidad. Los resultados de los parámetros determinados se entregan en formato PDF.
Resistencia in situ con presión de poros (CPTu) y densidad in situ.	●	●	●	●	En la actualidad no se realizan.
Ensayo de Proctor (modificado y/o simple).	●	●	●	●	
Estudio y análisis de la segregación.	●	●	●	●	
Comportamiento y análisis reológico.	●	●	●	●	
Análisis de la permeabilidad.	●	●	●	●	No se realizan.
Curva de retención de agua (SWRC).	●	●	●	●	
Características del nivel freático.	●	●	●	●	
Clasificación de suelo (análisis granulométrico, límites de Atterberg y peso específico).	●	●	●	●	No se realizan.
Parámetros de resistencia estática y cíclica.	●	●	●	●	
Análisis de la licuefacción estática y dinámica	●	●	●	●	
Geoquímica					

<u>Ensayos in situ:</u>					
- pH y conductividad eléctrica (CE).	●	●	●	●	No se realizan.
- Análisis elemental (Fluorescencia de rayos X Portátil).	●	●	●	●	
<u>Ensayos de laboratorios:</u>					
- Identificación petrográfica y mineralógica (Lupa binocular, microscopio petrográfico, etc.).	●	●	●	●	No se realizan.
- Análisis elemental (Fluorescencia de Rayos X, ICP-MS, ICP-OES, espectrómetro de absorción atómica, etc.).	●	●	●	●	
- Análisis mineralógico (Difracción de Rayos X, microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía electrónica de transmisión (TEM), QEMSCAN, espectroscopia Mössbauer, etc.).	●	●	●	●	No se realizan.
<u>Ensayos estáticos:</u>					
- pH en pasta y conductividad eléctrica.	●	●	●	●	Los resultados son entregados y almacenados en formato PDF, lo cual no cumple del todo con lo recomendado en la metodología propuesta.
- Test ABA modificado.	●	●	●	●	
- Test NAG (simple y/o secuencial).	●	●	●	●	
- Ensayos de lixiviación.	●	●	●	●	
Ensayos cinéticos (celdas húmedas, test en columnas, B.C. Research Confirmation Test, Soxhlet Extraction, etc.).	●	●	●	●	
Análisis hidrogeoquímico del agua presente en: la laguna operacional y el sistema de drenaje.	●	●	●	●	Se determina el pH, conductividad eléctrica, análisis elemental y mineralógico.
Requerimientos complementarios					
Estudio y análisis de la geología y geoquímica del material que	●	●	●	●	

da origen al relave.					
----------------------	--	--	--	--	--

Simbología

- Si.
- Parcialmente.
- No.

Como se aprecia en la planilla (ver **Tabla 6.2**), las propiedades físicas del relave que actualmente se caracterizan son las siguientes: densidad aparente, gravedad específica, densidad seca, contenido humedad, comportamiento y análisis reológico, y características del nivel freático. Mientras que, las demás propiedades que no forman parte del plan de caracterización actual están incorporadas en el plan de caracterizaciones a corto y largo plazo a realizar en el tranque de relaves. Es importante destacar que, una posible causa de que varios requerimientos no se determinen en la actualidad, es la corta vida que tiene el depósito, la cual corresponde a dos años.

Respecto a la clasificación de suelo, se recomienda complementar con el método RSCS, debido al alto contenido de finos presentes en el depósito, y que este método permite analizar en mayor detalle.

El análisis geoquímico in situ, no forma parte de las caracterizaciones que se le realizan al relave, así como también la identificación petrográfica y el análisis mineralógico realizado en laboratorio. Mientras que, los resultados del análisis elemental, los ensayos estáticos y dinámicos, y análisis hidrogeoquímicos, son entregados en formato PDF, lo cual dificulta el trabajo con dichos valores, y a su vez no cumple con lo indicado en la metodología propuesta.

El análisis hidrogeoquímico de las aguas presentes en diferentes infraestructuras del depósito, se realiza con el fin de determinar su pH, conductividad eléctrica, análisis elemental y mineralógico, lo cual permite mantener un monitoreo de la calidad de estas aguas.

7. Conclusión y recomendaciones

En base a la revisión, recopilación y análisis realizados en el presente trabajo de los boletines, guías y estándares de libre acceso, publicados por el ICM, ANCOLD, MAC, ICOLD y EGBC, las cuales corresponden a asociaciones internacionales que se enfocan en la gestión de depósito de relaves. Así como también, de lo estipulado en la normativa vigente de depósitos de relaves en Chile. Se obtuvieron los requerimientos que se deben cumplir al momento de caracterizar el suelo de fundación de un depósito de relaves, y del relave mismo.

Con ellos se estableció un sistema de gestión administrativa para dar cumplimiento a lo estipulado en el requerimiento 2.2 del GISTM, lo cual se realizó a través de una metodología de cumplimiento de dichos requerimientos. Esta metodología se dividió en dos partes, la primera se enfocó en la caracterización del sitio de emplazamiento del depósito, mientras que la segunda se orientó en la caracterización del relave. Para ambas, se creó una planilla de verificación de los requerimientos que deben ser parte de cada caracterización a realizar, con el fin de cumplir con el requerimiento 2.2. Además, las planilla permiten evaluar si cada requerimiento se encuentra en una plataforma digital de fácil acceso y manejo de datos, así como también incluyen la verificación que los requerimiento no excedan una antigüedad mayor a 5 años desde su fecha de obtención, al igual que su forma de obtención sea utilizando tecnologías, instrumentos y/o metodologías más recientes.

Al aplicar la metodología propuesta en la caracterización que se realiza en la actualidad en el tranque de relaves de Minera Spence, se observó que las caracterizaciones realizadas al suelo de fundación cumplen casi en la totalidad de los requerimientos propuestos. Los casos donde no se cumplen corresponden a: imágenes LiDAR e InSAR, y el análisis elemental in situ, ambas no forman parte de las caracterizaciones realizadas al sitio, ni tampoco están presentes en la planificación de caracterizaciones a realizar en el corto o largo plazo. Se recomienda que ambas sean incorporadas en el plan de caracterización que actualmente se está desarrollando, ya que, las imágenes LiDAR permiten crear un modelo 3D de todo el sitio de emplazamiento y sus alrededores, lo cual aumenta el control de los riesgos que pueden afectar al depósito. Al igual, incorporar un análisis elemental in situ es importante debido a que este entrega información con menos incertidumbres que las muestras que se llevan a los laboratorios.

El análisis de la resistencia in situ hasta la fecha se ha obtenido a través del método SPT. Este, no se recomienda debido a la poca sensibilidad de sus resultados, por lo cual el método más seguro es el CPT. El cambio de método es imperioso, por lo cual en la actualidad el cambio de instrumento está dentro del nuevo plan de caracterización a realizar a corto y largo plazo.

Para el caso de las caracterizaciones del relave y de las instalaciones del depósito, el

cumplimiento de los requerimientos de caracterización propuestos es bajo. Esto se debe a que el depósito cuenta con poco tiempo de operatividad, lo cual ha generado que a medida que pasa el tiempo se van agregando nuevos estudios, ensayos y análisis de caracterización al material. Los requerimientos que actualmente no se realizan, están dentro del plan de caracterización que se realizó a corto y largo plazo en el depósito. Cabe destacar que, se recomienda que la obtención de esos parámetros se realice a la brevedad posible, ya que, el nivel de incertidumbre respecto a la estabilidad del tranque en la actualidad es alta.

Por otro lado, se observa que varios requerimientos no están almacenados en plataformas digitales de fácil acceso y de fácil manejo de datos. La mayoría se encuentra en forma PDF, el cual no permite generar estadísticas de los datos, sin tener que transcribir dichos datos, lo que aumenta la probabilidad de cometer errores en los cálculos a realizar, y por ende la incertidumbre de ellos.

Finalmente, se puede concluir que la metodología propuesta permite dar cumplimiento al requerimiento 2.2 del GISTM, y a su vez a la normativa chilena vigente de caracterización de tranques de relaves. Además, permite generar un control de los parámetros necesarios para monitorear la estabilidad y calidad del relave, así como también de todas las instalaciones que conforman al depósito, lo anterior provoca la disminución de la incertidumbre y el riesgo de una falla en las instalaciones.

Referencias

ANCOLD. (2012). *Guidelines on Tailings Dams - Planning, Design, Construction, Operation and Closure*. ANCOLD.

BBC News Mundo. (2019, enero 27). *Presa de Brumadinho en Brasil: ¿Qué falló en el dique cuya ruptura ha dejado al menos 60 muertos y casi 300 desaparecidos?* Retrieved enero [consulta: 2022], from BBC News Mundo: <<https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-47007628>>

BHP. (2021). *Portal BHP*. Retrieved [consulta: 2022], from BHP: <<https://www.bhp.com/es>>

DITR. (2007). *Tailings Management, Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining*. Australian Government Department of Industry, Tourism and Resources.

EGBC. (2016). *APEGBC Professional Practice Guidelines - Site Characterization for Dam Foundations in BC*. Association Professional Engineers and Geoscientists of BC.

EGBC. (n.d.). *Who we are*. Retrieved agosto 2022, from Engineers and Geoscientists British Columbia: <https://www.egbc.ca/About/About-Us/Who-We-Are>

ICMM. (2003). *Sustainable Development Framework – Final Principles, International Council on Mining and*.

ICMM. (2021). *Protocolos de Conformidad: Global de la Industria en el Tratamiento de Relaves*. ICMM.

ICMM. (2021). *Tailings Management: Good Practice Guide*. ICMM.

ICMM. (n.d.). *our history*. Retrieved Febrero 2022, from ICMM, International Council on Mining & Metals: <https://www.icmm.com/en-gb/about-us/our-history#>.

ICOLD. (2020). *Tailings Dam Safety*. Committee L Tailings Dams and Waste Lagoons .

ICOLD Argentina. (n.d.). *¿Qué es el ICOLD?* Retrieved mayo 2022, from Comité Argentino de Presas (CAP): <https://www.cadp.org.ar/icold/>

ICOLD Chile. (n.d.). *Historia Chilena*. Retrieved mayo 2022, from Comité Nacional Chileno de Grandes Presas: <https://www.icoldchile.cl/historia-chilena/>

ICOLD. (n.d.). *History*. Retrieved mayo 2022, from International Commission on Large Dams: <https://www.icold-cigb.org/GB/icold/history.asp>.

International Council on Mining & Metals; UNO environment programme; Principles for Responsible Investment. (2020). *Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera*.

MAC. (2019). *Towards Sustainable Mining - Tailings Management Protocol*. MAC.

MAC. (2021). *A Guide to the Management of Tailings Facilities - Version 3.2*. The Mining Association of Canada.

MAC. (2021). *Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities - Version 2.2*. The Mining Association of Canada.

MAC. (2021). *Equivalency Between Requirements of Towards Sustainable Mining and the Global Industry Standard on Tailings Management*. Mining Association of Canada.

MAC. (n.d.). *Corporate Responsibility*. Retrieved Marzo 2022, from The Mining Association of Canada: <https://mining.ca/our-focus/corporate-responsibility/>.

MAC. (n.d.). *MAC*. Retrieved Marzo 2022, from The Mining Association of Canada: <https://mining.ca/>.

Ministerio de Minería . (2019). *Plan Nacional de Depósitos de Relaves para una Minería Sostenible*. Santiago: Maval SpA.

Ministerio de Minería. (2007). *Decreto Supremo N°248*. Ministerio de Minería.

Monge E., J., Rosenberg V., L., Vives E., A., & Yoma Y., F. (1965). *Sismo del 28 de marzo de 1965, Chile. Informe sobre daños en estructuras*. Santiago: Universidad de Chile.

ONU Programa para el Medio Ambiente. (2020, Agosto 05). *Nuevo estándar para empresas mineras ayudará a mejorar la seguridad de las instalaciones de relaves*. Retrieved [Consulta: 2022], from ONU Programa para el Medio Ambiente: <<https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/nuevo-estandar-para-empresas-mineras-ayudara-mejorar-la>>

Programa Tranque. (2018). *Avances y Retos para la Gestión de los Depósitos de Relaves en Chile*. Santiago: Fundación Chile.

Riveros, C. (2021, Noviembre 11). *Relaves en Chile: modelo de gestión a seguir*. Retrieved [consulta: 2022], from El Periodista: <<https://www.elperiodista.cl/2021/11/relaves-en-chile-modelo-de-gestion-a-seguir/#:~:text=Seg%C3%BAn%20datos%20de%20Sernageomin%2C%20hoy%20en%20Chile%20se,abandonados%2C%20101%20activos%20y%20469%20inactivos%20%28Catastro%20Sernageomin%29>>>

SEA. (2020). *Guía trámite PAS artículo 135 reglamento del SEIA - Construcción y Operación de depósitos de relaves*. Gobierno de Chile, SERNAGEOMIN. Servicio de Evaluación Ambiental.

SERNAGEOMIN. (2007). *Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves*. Departamento de seguridad Minera.

SERNAGEOMIN. (2010). *Fija contenido del formulario para el informe trimestral sobre operación y mantención de depósito de relaves*. Santiago: Gobierno de Chile.

SERNAGEOMIN. (2018). *"Estudios de Normativas Internacionales de Diseño, Construcción, Operación, Cierre y Post Cierre de Depósitos de Relaves"*. Santiago: Ministerio de Minería.

SERNAGEOMIN. (n.d.). *Datos Públicos Depósito de Relaves*. Retrieved 2022, from Depósitos de Relaves: <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>

SERNAGEOMIN. (n.d.). *Servicio Nacional de Geología y Minería*. Retrieved [consulta: 2022], from Servicio Nacional de Geología y Minería: <<https://www.sernageomin.cl/mision-y-vision-institucional/>>

SERNAGEOMIN, CORFO & Fundación Chile. (2015). *Guía Metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras*.

SERNAGEOMIN, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso & CORFO. (2018). *Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes*. SERNAGEOMIN.

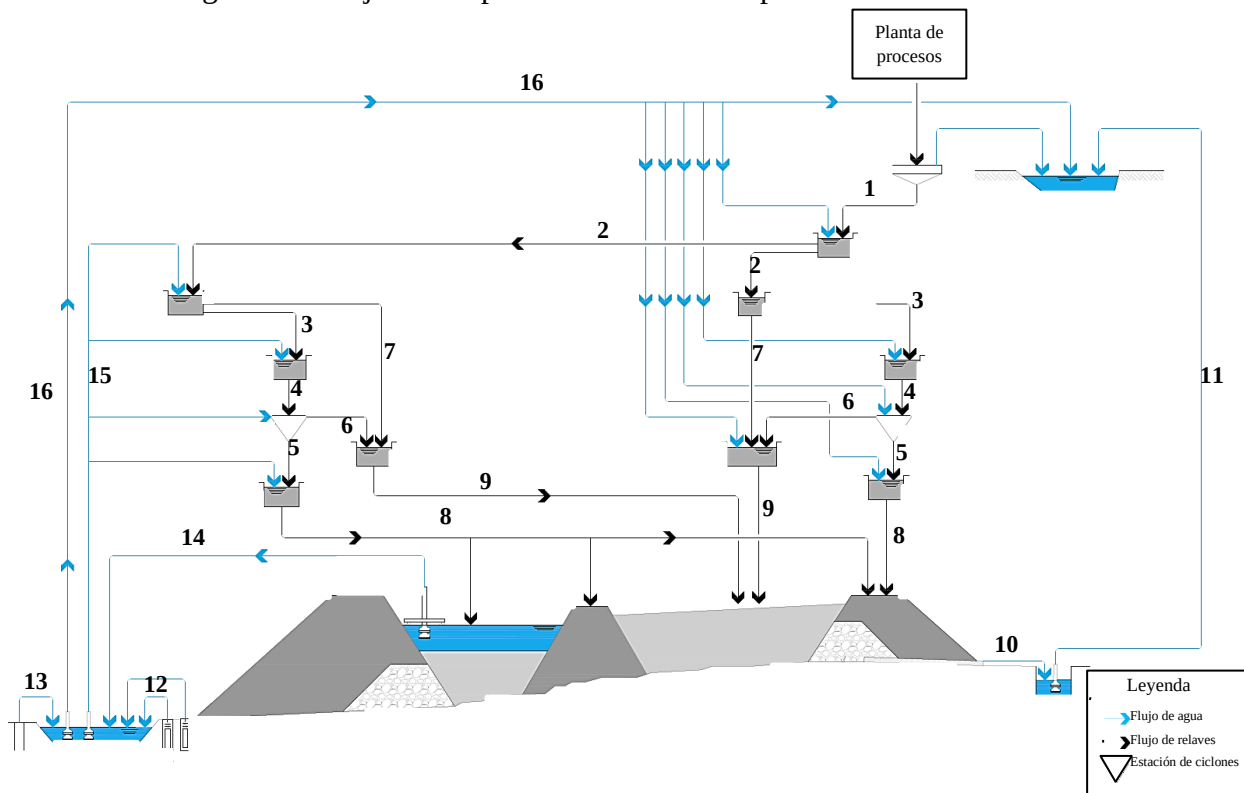
Tapia, M. (2022, 01 05). *Investigación plantea que en el país cada 30 horas se depositan relaves equivalentes al cerro Santa Lucía*. Retrieved from Universidad de Chile: <https://www.uchile.cl/noticias/183124/investigacion-u-de-chile-aborda-la-realidad-de-los-relaves-en-el-pais#:~:text=del%20procesamiento%20minero,-,%22En%20Chile%2C%20cada%2030%20horas%20se%20produce%20en%20cantidad%2>

0de,inactivos%20y%20173%20est%C3%A1n%20.

UNWCED. (1987). *Our Common Future, United Nations World Commission on Environment and Development*. Oxford: Oxford University Press.

Anexos

Anexo A: Diagrama de flujo del Depósito de relaves de Spence.



- 1) Flujo de relaves transportados desde la Planta Concentradora (espesadores de alta tasa) hacia el cajón de descarga de espesadores.
- 2) El cajón de descarga de espesadores a su vez alimenta a los cajones distribuidores de relaves este y suroeste.
- 3) Flujo de relaves desde los cajones distribuidores de relaves este y suroeste hacia los cajones de dilución de relaves este y suroeste, respectivamente.
- 4) Flujo de relaves desde los cajones de dilución de relaves este y suroeste hacia las estaciones de ciclones respectivas.
- 5) Flujo de arenas desde las estaciones de ciclones este y suroeste a los cajones de arenas respectivos.
- 6) Flujo de lamas desde las estaciones de ciclones este y suroeste a los cajones de lamas respectivos.
- 7) Flujo de relaves desde los cajones distribuidores de relaves hacia los cajones de lamas respectivos.
- 8) Descarga de arenas a la laguna operativa y muros de arena del depósito de relaves.
- 9) Descarga de lamas a la cubeta del depósito de relaves.
- 10) Flujo de agua desde sistema de drenaje de muros hacia cámara de distribución de drenaje este, suroeste, sur y sureste.
- 11) Flujo desde cámara de distribución de drenaje este, suroeste, sur y sureste hacia piscina de agua de proceso.
- 12) Flujo de agua desde pozos de infiltración principal y noroeste hacia piscina principal colectora de drenaje.
- 13) Flujo desde cámara de distribución de drenaje noroeste y noreste hacia piscina principal colectora de drenaje.

de drenaje.

14) Flujo de aguas recuperadas desde laguna operacional hacía piscina principal colectora de drenaje.

15) Flujo de aguas recuperadas desde piscina principal colectora de drenaje hacia cajón de arenas, estación de ciclones, cajón de dilución de relaves y cajón distribuidor de relaves suroeste.

16) Flujo de aguas recuperadas desde piscina principal colectora de drenaje hacia cajones de arenas y lamas, estación de ciclones, cajón de dilución de relaves este, cajón de descarga de espesadores y piscina de agua de proceso.

Anexo B: Aspectos monitoreados a través del formulario E-700.

Formulario E - 700

Informe Trimestral de Depósitos de Relaves, aprobado mediante la Resolución N°680, que fija el contenido del formulario referente a la operación y mantención de los depósitos de relaves.

Por ejemplo, actualmente, se debe informar:

- Cantidad de relaves autorizado y actual (totales);
- Cantidad de arenas en muro y de relaves (lamas) en la cubeta;
- Altura del muro o depósito;
- Largo y ancho de la berma de coronamiento;
- Distancia de la laguna al borde del muro;
- Ancho del sector "playa" en la cubeta;
- Revancha operacional mínima;
- Área ocupada (aprox.);
- Ángulo del talud externo e interno del muro;
- Razón arenas/lamas;
- % de sólido en peso del relave total;
- % de humedad en los relaves filtrados y/o espesados;
- Método de compactación del muro (equipo);
- Densidades y granulometría de las arenas del muro;
- Granulometría de las arenas del relave total y piezometría.

Se deben indicar también detalles de los trabajos de mantención y operación realizados, así como informar sobre los controles y estadísticas sobre monitoreos especiales (acelerógrafos, celdas de asentamientos, placas de corrimiento y nivelación, inclinómetros u otros) realizados.

Anexo C: Tabla de contenido de un informe de diseño de tranque de relaves en Australia.

1.0 INTRODUCTION

1.1 Background Information

1.2 Previous Studies

1.3	Scope of Work	
2.0	SUMMARY OF BACKGROUND CONDITIONS.	
2.1	Location	
2.2	Climate	
2.3	Hydrology	
2.3.1	Precipitation	
2.3.2	Evaporation	
2.3.3	Runoff.	
2.3.4	Storm Event Calculations	
2.3.5	Wind	
2.4	Site Geology	
2.5	Seismic Risk	
2.6	Baseline Water Quality	
3.0	TAILINGS PROPERTIES	
3.1	General	
3.2	Operational Data	
3.3	Physical Properties	
3.4	Geochemical Characterisation of Tailings and Waste Rock	
4.0	TAILINGS MANAGEMENT OPTIONS	
4.1	Design Considerations	
4.2	Options Evaluated	
4.2.1	Tailings Deposition Plan	
4.2.2	Closure Plan	
5.0	SITE SELECTION	
5.1	Preliminary Site Selection	
5.2	Preferred Location	
6.0	GEOTECHNICAL INVESTIGATION	
6.1	Previous Geotechnical Investigations	
6.2	Surface Fault Hazard Assessment	
6.3	Geotechnical Investigations	
6.4	Laboratory Testing Results	
6.5	Subsurface Conditions	
7.0	SITE HYDROGEOLOGY	
7.1	Hydraulic Conductivity	
7.2	Seepage Model	
7.2.1	Model Construction	
7.2.2	Model Calibration	
7.2.3	Sensitivity Analysis	
8.0	SEEPAGE WATER QUALITY	
9.0	TAILINGS STORAGE FACILITY DESIGN	
9.1	Design Basis and Considerations	
9.2	Design Criteria	
9.3	Health, Safety, Environment and Community Considerations	
9.4	TSF Layout	

- 9.4.1 Dam Alignments
 - 9.4.2 Storage Requirements
 - 9.4.3 General Arrangements
 - 9.4.4 Seepage Collection Pond
- 9.5 Closure Configuration
- 10.0 DAM DESIGN
 - 10.1 General
 - 10.2 Stage Construction and Dam Freeboard
 - 10.3 Embankment Section and Zoning
 - 10.3.1 Embankment Section
 - 10.3.2 Zoning
 - 10.3.3 Material Types
 - 10.4 Dam Seepage
 - 10.5 Filters
 - 10.6 Foundation Settlement
 - 10.7 Slope Stability
 - 10.7.1 General Stability Model Setup
 - 10.7.2 Effective Strength Parameters
 - 10.7.3 Undrained Strength Parameters for Foundation Soils
 - 10.7.4 Analyses and Results
 - 10.7.5 Deformation under Seismic Loading
 - 10.8 Seepage Collection Pond
 - 10.9 Storm Water Conveyance
 - 10.9.1 Diversion Drains
 - 10.9.2 Emergency Spillway
 - 10.10 Dam Instrumentation.
- 11.0 LINER DESIGN
 - 11.1 Liner Type Selection
 - 11.2 Liner Thickness and Texture Selection
 - 11.3 Liner Performance
 - 11.4 Underdrain
 - 11.5 Secondary Containment of TSF Seepage
- 12.0 WATER MANAGEMENT
 - 12.1 Site-Wide Water Balance
 - 12.2 TSF Water Balance Model
 - 12.3 Water Balance Analysis Results
 - 12.3.1 TSF Start-up Stage
 - 12.3.2 Operations Stage
 - 12.3.3 post-Closure
- 13.0 OPERATIONS GUIDELINES
 - 13.1 General
 - 13.4 Tailings Operations
 - 13.4.1 Scope
 - 13.4.2 Personnel

13.4.3	Equipment
13.4.4	Tailings Deposition
13.4.5	Water Reclaim
13.4.6	Seepage Collection Pond
13.4.7	Water Management
13.4.8	Maintenance
13.4.9	Surveillance and Monitoring
13.4.10	Dam Raising
13.5	Deposition Plan
13.5.1	Objectives
13.5.2	Planning
13.5.3	Typical Operating Stage
13.5.4	Start Up
13.5.5	Non-compliance
13.6	Operating Risk and Contingency Planning
14.0	CONSTRUCTION
14.1	Staged Construction Schedule
14.2	Construction Materials
14.2.1	Earthfill
14.2.2	Granular Materials
14.3	Foundation Preparation
14.4	Stage Construction
14.5	Access Roads
14.6	Seepage Collection Pond
14.7	Liner and Underdrain Installation
14.8	Silt Control
14.9	Quantities Estimate
14.10	Design Drawings and Technical Specifications
15.0	CLOSURE AND RECLAMATION
15.1	Capital Work for Closure
15.2	Long-Term Care and Maintenance
15.3	Water Management
16.0	CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS
17.0	REFERENCES